INVESTIGACIÓN Y CIENCIA | FEBRERO 2015 | N.º 461
IDEAS QUE CAMBIAN EL MUNDO | FÓSILES DE LA VÍA LÁCTEA | TERENCE TAO Y LAS LEYES UNIVERSALES

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Febrero 2015 InvestigacionyCiencia.es
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

ASTRONOMÍA
Fósiles de la Vía Láctea

MEDICINA
Trampas inmunitarias de la gripe

MATEMÁTICAS
Terence Tao y las leyes universales

LEGO A ESCALA ATÓMICA

CÉLULAS REPROGRAMABLES

Ideas para cambiar el mundo

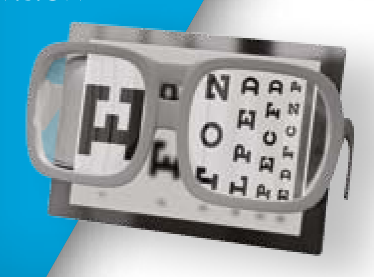
10 técnicas innovadoras

RECARGA INALÁMBRICA CON ONDAS SONORAS



EDICIÓN GENÉTICA MÁS PRECISA

PANTALLAS CORRECTORAS DE LA VISIÓN



ORGANISMOS TRANSPARENTES



6,90 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Febrero 2015, Número 461



52

ARTÍCULOS

INNOVACIÓN
Ideas que cambian el mundo
PÁGINA 16
La edición genética, más precisa
Por Margaret Knox
Lego a escala atómica
Por Andre K. Geim
Otras: Células reprogramables. Organismos transparentes. Pilas de combustible alimentadas con saliva. Pantallas correctoras de la visión. Plásticos ultraduros reciclables. Recarga inalámbrica con ondas sonoras. Baterías que aprovechan el calor residual. Videocámaras que detectan nanopartículas. *Por Ryan Bradley, Rachel Nuwer y Ben Fogelson*

ASTRONOMÍA
30 Los fósiles de la Vía Láctea
En el pasado, la Vía Láctea engulló un gran número de galaxias enanas. Los restos de ese banquete cósmico están ayudando a los expertos a entender cómo se formó nuestro particular rincón del universo. *Por Kathryn V. Johnston*

MEDICINA
36 El endotelio, un órgano clave
El tejido que tapiza el interior de venas y arterias desempeña tantas funciones básicas que su daño puede perjudicar gravemente la salud. Conocer las marcas moleculares de esta alteración facilitaría la prevención y el tratamiento de numerosas enfermedades. *Por Marta Palomo, Enric Carreras y Maribel Díaz Ricart*

CLIMA
52 El comportamiento anómalo de la corriente en chorro
Los veranos e inviernos extremos de los últimos cuatro años tal vez se conviertan en algo habitual. *Por Jeff Masters*

MATEMÁTICAS
60 Leyes universales
Varios sistemas complejos muy dispares presentan el mismo comportamiento a gran escala. Aunque el fenómeno se ha observado en todo tipo de contextos, su fundamentación matemática sigue planteando numerosas preguntas. *Por Terence Tao*

BIOLOGÍA
68 La farsa de la araña
Algunos arácnidos llegan a extremos insospechados para imitar el aspecto y el comportamiento de las hormigas. *Por Ximena Nelson*

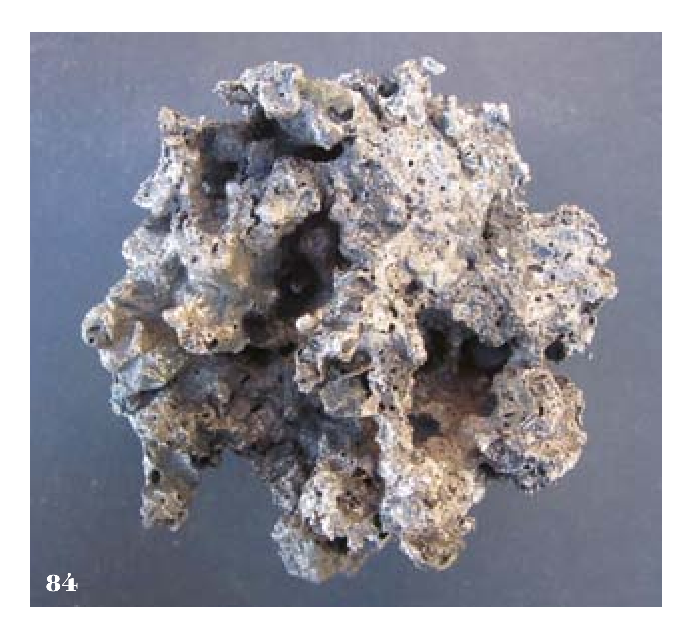
INMUNOLOGÍA
72 La ilusión de la inmunidad
Los modelos matemáticos de la respuesta inmunitaria sugieren que nuestras defensas cometen errores a la hora de reconocer las sutiles mutaciones del virus de la gripe. *Por Adam J. Kucharski*

SOSTENIBILIDAD
78 Un rompecabezas global
Nuestro futuro dependerá de la capacidad para integrar los retos en energía, agua y alimentación. *Por Michael E. Webber*

SANDRA KREUZINGER, GETTY IMAGES



49



INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

3 Cartas de los lectores

4 Apuntes
Los problemas de privacidad llegan al espacio. Hemoglobina en la remolacha. Patios escolares y ejercicio físico. El hadrosaurio corría más que *T. rex*. Confirmada la existencia de un nuevo tipo de enlace químico. Alerta anticipada del alzhéimer.

7 Agenda

8 Panorama
El teorema de Kochen-Specker llega al laboratorio.
Por Adán Cabello
El auge incesante del ébola. *Por Mark Fischetti*
El lado humano del problema energético. *Por Benjamin K. Sovacool*
Guía para interpretar con escepticismo las investigaciones sobre el microbioma. *Por William P. Hanage*

44 De cerca
Formaciones biosalinas.
Por José María Gómez Gómez

46 Historia de la ciencia
La verdadera historia del led.
Por Nikolay Zheludev

49 Foro científico
La era de la hidrodiplomacia.
Por Jan Eliasson

84 Taller y laboratorio
Microsiderurgia.
Por Marc Boada

88 Juegos matemáticos
Criptografía segura.
Por Agustín Rayo

91 Libros
Aristóteles. Células madre. Multiverso.
Por Luis Alonso

96 Hace...
50, 100 y 150 años.

EN PORTADA

Una vez más, *Investigación y Ciencia* presenta los avances del año que en el futuro podrían acarrear cambios importantes en nuestras vidas y en el planeta. Entre ellos, una nueva técnica de ingeniería genética, chips para reprogramar células, animales transparentes en los que podrán estudiarse procesos biológicos clave, pantallas de teléfonos que se ajustarán a la vista del usuario, láminas de materiales de un átomo de espesor o un sistema sin cables para recargar los dispositivos electrónicos. Ilustración: Ben Woldman



redaccion@investigacionyciencia.es



Septiembre y octubre 2014

DEL INODORO AL GRIFO

En «Reutilización de aguas residuales» [Investigación y Ciencia, septiembre de 2014], Olive Heffernan pasa por alto un aspecto de suma importancia: la fiabilidad del proceso.

Ningún equipo funciona siempre a la perfección. Dado que aquí el producto es agua de grifo, será necesario aplicar medidas excepcionales de automatización y control de calidad para detectar cualquier fallo y cerrar la planta ante el menor indicio de problemas.

R. W. Lowrie
Dade City, Florida

El procedimiento descrito para potabilizar aguas residuales y convertirlas en agua de grifo implica usar ósmosis inversa, un proceso destinado a eliminar las sales. Sin embargo, ¿no resultaría más sencillo usar la misma técnica para tratar agua de mar, aún más abundante?

Greg Arzoomanian
Providence, Rhode Island

El artículo de Heffernan señala que las aguas residuales purificadas contienen sustancias como jabón de manos «en concentraciones tan ínfimas que resultan inocuas». Pero, si el agua se recicla una y otra vez y tales sustancias no se descomponen, ¿no podría su concentración aumentar con el tiempo?

Tom Fitz
Colegio Universitario Northland

Responde Heffernan: *Por supuesto, ningún equipo es infalible, por lo que controlar cada paso será un aspecto clave en todo sistema de potabilización de aguas negras. La razón por la que el procedimiento empleado en San Diego se divide en varios pasos con sus respectivas barreras se debe, en parte, a que ello permite tener cada tramo bajo control, lo que posibilita cerrar temporalmente la planta si cualquiera de las etapas fracasa.*

Potabilizar aguas residuales no es necesariamente más fácil que desalinizar agua de mar, ya que el tratamiento de aguas negras implica otros pasos, además de la ósmosis inversa. Pero, probablemente, sí resulte más económico y menos perjudicial para el entorno. En primer lugar, porque el producto se encuentra disponible in situ, lo que ahorra la energía y la infraestructura necesarias para bombear agua de mar. Pero, además, la desalinización de agua marina genera grandes cantidades de salmuera, la cual debe desecharse. Las aguas residuales, en cambio, han de verterse siempre en algún sitio. En San Diego, si no se reutilizasen, acabarían en el mar y contaminarían la costa.

Por último, aunque no es posible eliminar por completo la exposición a pequeñas dosis de sustancias como fármacos o productos de aseo personal, el sistema empleado en San Diego reduce dicho riesgo a niveles muy bajos, al tiempo que evita la acumulación de sustancias en varias etapas del proceso. Ello protege el suministro aunque uno de tales pasos falle.

MÁS SOBRE HERENCIA EPIGENÉTICA

En «Un nuevo tipo de herencia» [Investigación y Ciencia, octubre de 2014], Michael Skinner analiza la posibilidad de que algunos trastornos hereditarios humanos se deban a epimutaciones (cambios en moléculas que afectan a la actividad génica, pero que no alteran el ADN). El artículo detalla varios ejemplos potenciales de herencia epigenética multigeneracional; sin embargo, no menciona ninguno de los problemas de interpretación que afectan a los estudios en este campo.

Si bien los efectos observados en ratones tras la exposición a algunas sustancias se ajustan a una de las definiciones de epigenética, no existen pruebas convincentes de que el fenotipo heredado esté causado por —y no simplemente correlacionado con— alteraciones en marcas epigenéticas, como la metilación del ADN.

Duncan Sproul
Unidad de Genética Humana MRC
Universidad de Edimburgo

La posibilidad de transmitir características sin alterar el ADN me recuerda al biólogo soviético Trofim Lysenko y sus teorías sobre la herencia de características adquiridas. ¿Guarda la noción de transmisión epigenética de rasgos inducidos por el ambiente alguna relación con sus planteamientos?

Mel Tremper
Berwyn Heights, Maryland

Responde Skinner: *La herencia epigenética transgeneracional no solo se ha observado en ratones, sino también en plantas, moscas, gusanos, peces, cerdos y humanos. El primer paso a la hora de investigar mutaciones genéticas o epigenéticas consiste en identificar los hechos y la reproducibilidad del fenómeno. Superada esa fase, podrán comenzar los estudios sobre las relaciones de causa y efecto, necesarios tanto en genética como en epigenética.*

Con respecto a la segunda observación, ya a comienzos del siglo xix Jean-Baptiste Lamarck propuso que los factores ambientales podrían provocar cambios fenotípicos que influyesen en la evolución. Más tarde, Lysenko elaboró sus teorías a partir de esos postulados. Varios investigadores opinan que la herencia transgeneracional de cambios epigenéticos inducidos por el ambiente es una idea neolamarckiana. Por supuesto, ni Lamarck ni Lysenko sospechaban qué mecanismos moleculares podían estar implicados en el proceso. La investigación actual en epigenética da una respuesta a esa pregunta.

Erratum corrige

En el apunte **En el estudio de audición** [Investigación y Ciencia, noviembre de 2014] hay un error geográfico: la Universidad McMaster no se halla en Toronto, sino en Hamilton, Ontario.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



CRIPTOGRAFÍA

Los problemas de privacidad llegan al espacio

En febrero de 2009, el satélite estadounidense de comunicaciones Iridium 33 chocó contra el Cosmos 2251, de origen ruso. La colisión acabó al instante con ambos aparatos. Según los sistemas terrestres encargados de seguir sus trayectorias, parecía que los objetos pasarían de largo. Sin embargo, habría bastado con los instrumentos de a bordo de uno cualquiera de los dos satélites para concluir lo contrario. Entonces ¿por qué los operadores no usaron esa información?

En realidad, los datos orbitales son secretos. Sus propietarios los consideran privados y las empresas temen perder su ventaja competitiva si los hacen públicos, ya que una compañía rival podría deducir su capacidad operativa a partir de esa información. Los Gobiernos, por su parte, temen que revelar esos datos merme la seguridad nacional. Pero incluso las colisiones de poca importancia pueden causar daños de millones de dólares, así como invadir con sus restos las trayectorias de otros satélites o de naves espaciales tripuladas, como la Estación Espacial Internacional. Por esa razón, el choque entre el Iridium y el Cosmos empujó al sector a buscar soluciones al problema.

En la actualidad, los cuatro mayores proveedores mundiales de comunicaciones por satélite se han asociado con Analytical Graphics, una tercera empresa a la que confían sus datos. La compañía agrega todos los datos orbitales e informa a sus dueños cuando los satélites corren peligro. Este arreglo, sin embargo, requiere que todos los participantes confíen en un tercero, algo que será difícil o imposible de mantener cuando aparezcan nuevos agentes y haya más satélites en órbita.

Algunos expertos creen que una mejor opción consistiría en recurrir a la criptografía. En los años ochenta del siglo pasado, se crearon algoritmos que permitían a varios individuos calcular de manera conjunta una función con datos privados sin tener que revelar secretos. Con el objetivo de compartir datos entre satélites, la Agencia de Proyectos Avanzados de Investigación para la Defensa de EE.UU. (DARPA) encargó en 2010 a varios equipos de criptógrafos que aplicasen la técnica a la creación de protocolos de cálculo seguro con múltiples participantes (MPC, por sus siglas en inglés). Según este método, cada participante descarga datos de su propiedad en programas informáticos que le pertenecen, que, después, intercambian mensajes según un protocolo MPC público. Este permite que los clientes puedan calcular un resultado que se desea conocer, como la probabilidad de una colisión, pero nada más. Y, dado que el protocolo es público, cada interesado puede escribir sus propios programas sin necesidad de fiarse de los demás.

Por el momento, uno de los inconvenientes de la criptografía de datos orbitales radica en la velocidad de los satélites. Calcular una probabilidad de colisión requiere llevar a cabo complejos cálculos. Pero, mientras que para hacerlo de manera insegura apenas se necesitan unos milisegundos, ejecutar los protocolos lleva 90 segundos en un ordenador comercial. Con todo, a medida que aumente la capacidad de cómputo, los protocolos MPC se tornarán más útiles. De momento, el empeño de la DARPA ya ha comenzado a dar sus frutos con un primer algoritmo de prueba. Por ahora nadie está usando tales protocolos con fines prácticos, pero los criptógrafos buscan a todo aquel que esté dispuesto a adoptar la técnica.

—Brett Hemenway, Universidad de Pensilvania
—Bill Welser, Corporación RAND

ISTOCKPHOTO

BOTÁNICA

Hemoglobina en la remolacha



La hemoglobina es la proteína más destacada de los glóbulos rojos. Transporta oxígeno y otros gases a bordo de estas células, que circulan por el cuerpo de casi todos los vertebrados. Menos conocida es su presencia en los vegetales, como en la remolacha azucarera, en la cual Nélida Leiva-Eriksson la ha descubierto hace poco mientras trabajaba en su tesis doctoral en la Universidad de Lund. En realidad, muchas plantas terrestres, desde la cebada hasta los tomates, la contienen, asegura Raúl Arredondo-Peter, experto en la evolución de las hemoglobinas vegetales (o leghemoglobinas) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. «Las hemoglobinas son proteínas muy antiguas», señala. Se descubrieron por primera vez en los brillantes nódulos rojos de las raíces de la soja en 1939, pero se ignora todavía la función que desempeñan en la mayoría de las plantas. Existe la idea de que captan óxido nítrico y lo distribuyen a las células, como parte de las señales que regulan el crecimiento.

Los investigadores están examinando las posibles aplicaciones de las leghemoglobinas. Robert Hill, biólogo vegetal de la Universidad de Manitoba, ha descubierto que la alfalfa modificada genéticamente para producir más de estas proteínas eleva del 20 al 80 por ciento la supervivencia de cultivos anegados. Las hemoglobinas vegetales podrían servir incluso como sustitutas de la sangre humana, una idea que Arredondo-Peter considera concebible pero lejana porque no transportan ni liberan el oxígeno con la misma velocidad que las humanas. O podrían ser aprovechadas para engañar a nuestros sentidos: bromatólogos de la Universidad Stanford experimentan con su introducción en hamburguesas vegetales para dotarlas de un sabor similar al de un filete jugoso.

—Amy Nordrum

ENTORNO URBANO

Patios escolares y ejercicio físico



Según los Centros para el Control y Prevención de Enfermedades de EE.UU., niños y adolescentes deberían hacer al menos una hora de ejercicio físico al día. Sin embargo, menos de la mitad de los niños estadounidenses de entre 6 y 11 años satisface ese requisito; entre los adolescentes de 12 a 19 años, solo lo cumple un 8 por ciento. La escuela promueve la actividad física, ya que los niños pueden llegar a practicar el 40 por ciento del ejercicio diario que necesitan durante las horas de recreo. Pero ¿cómo invierten exactamente el tiempo?

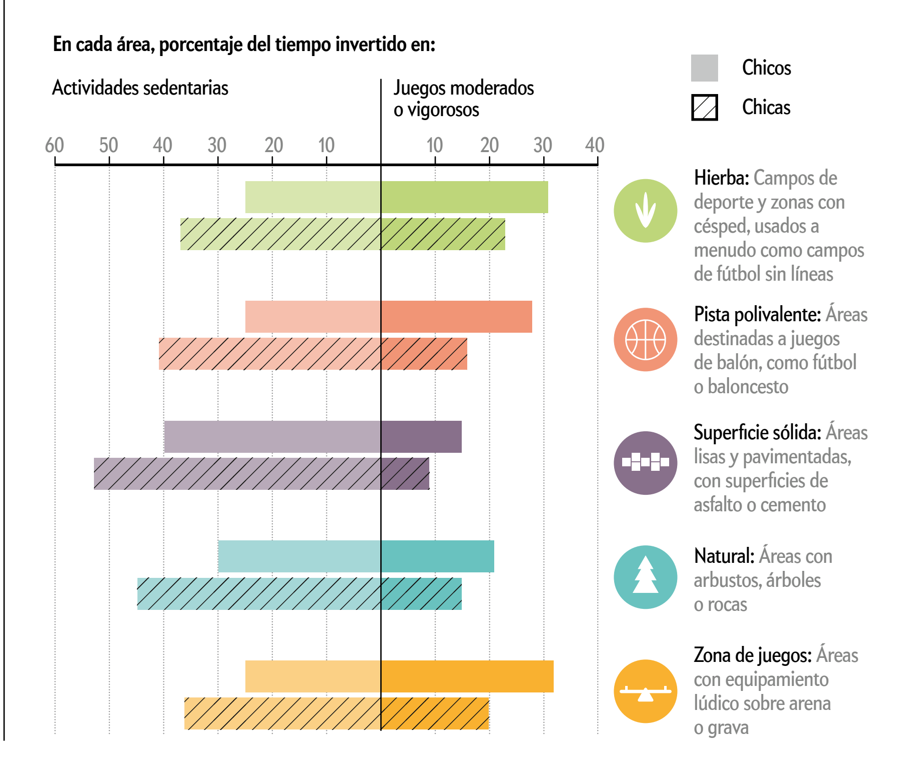
Un estudio reciente realizado en Dinamarca ha arrojado interesantes datos al respecto. Tras equipar a cientos de escolares de entornos urbanos con acelerómetros y dispositivos GPS, los investigadores analizaron sus movimientos a lo largo del día. Henriette Bondo Andersen, del departamento de ciencias del deporte y biomecánica clínica de la Universidad del Sur de Dinamarca, y otros colaboradores se valieron de esos datos para estudiar el comportamiento de los alumnos durante los recreos y, en particular, si el tipo de patio (de hierba, asfaltado, etcétera) guardaría alguna relación con su actividad física.

Los autores observaron que los niños practicaban más ejercicio en las zonas con hierba o áreas de juegos. Los patios de cemento, en cambio, incitaban a una mayor pasividad. En los cinco tipos de entorno investigados, las chicas se mostraron más sedentarias que sus compañeros varones. Los resultados (*abajo*) aparecerán publicados este mismo mes en la revista *Landscape and Urban Planning*.

Saber qué elementos tienden a propiciar una mayor actividad física durante los recreos ayudaría a promover la construcción de tales espacios en las escuelas. «Estamos colaborando con siete colegios que se han propuesto incluir zonas de baile, escalada, patinaje y cama elástica en sus patios», señala Andersen. «El objetivo consiste en diseñarlos de una manera que facilite que los chicos elijan permanecer activos.»

—Rachel Nuwer

ACTIVIDAD EN LAS ZONAS DE RECREO



ISTOCKPHOTO (*remolacha*); GETTY IMAGES (*niños jugando*); FUENTE: «OBJECTIVELY MEASURED DIFFERENCES IN PHYSICAL ACTIVITY IN FIVE TYPES OF SCHOOLYARD AREA», DE HENRIETTE BONDO ANDERSEN ET AL., EN *LANSCAPE AND URBAN PLANNING*, VOL. 134, FEBRERO DE 2015 (*gráfica*)

LOCOMOCIÓN

El hadrosaurio corría más que *T. rex*

Pobre hadrosaurio. El dinosaurio con pico de pato carecía de cornamenta, coraza o colmillos que esgrimir contra el acoso de *Tyrannosaurus rex*. Demasiado voluminoso para trepar a un árbol o buscar refugio bajo tierra, era, para colmo de males, lento. Pero por suerte, la anatomía de sus extremidades traseras y de los músculos de la cola pudo servirle para huir de las enormes fauces del tiranosaurio.

T. rex ganaba en el esprín, pero el hadrosaurio lo dejaba atrás en las distancias largas, explica el paleontólogo W. Scott Persons en un estudio sobre los músculos caudofemorales de los dinosaurios, publicado el pasado noviembre por Indiana University Press. El caudofemoral izquierdo y derecho de los dinosaurios terópodos eran grandes músculos caudales anclados a los huesos superiores de la extremidad. Su contracción balanceaba la extremidad posterior hacia atrás, impulsando al dinosaurio hacia delante. Las impresiones fósiles de *T. rex* demuestran que tales músculos estaban fijados al fémur cerca de la cavidad donde se inserta la cabeza de este hueso en la cadera (acetábulo). Según Persons, la extrapolación a partir de modelos informáticos en 3D de reptiles actuales indica que la distancia física que el músculo cubría para contraerse y mover así la extremidad a lo largo de un arco simple era sumamente corta. Las contracciones cortas permitían al *T. rex* dar zancadas rápidas y largas.

En cambio, el músculo caudofemoral del hadrosaurio, de tamaño similar, estaba insertado en un punto mucho más bajo del fémur, con lo que las contracciones musculares eran considerablemente más largas, lo que se traducía en zancadas más cortas y lentas. Ello le situaba en desventaja respecto al *T. rex*.

La única posibilidad de *T. rex* para cazar un hadrosaurio era caer sobre él por sorpresa

En una carrera prolongada, empero, el resultado había de ser diferente. La cercanía del músculo caudofemoral de *T. rex* a la cabeza del fémur significa que el carnívoro debía hacer un gran esfuerzo para desplazar la extremidad y se cansaba pronto (imaginemos la fuerza que se necesitaría para abrir y cerrar una puerta si el pomo estuviese situado a escasos diez centímetros de la bisagra). En el hadrosaurio, la mayor fuerza de palanca y las contracciones musculares más pausadas le permitían correr una gran distancia sin tanta fatiga.

En definitiva, la única posibilidad de *T. rex* para cazar un hadrosaurio era caer sobre él por sorpresa, destaca Persons. Pero si lo comparamos con los grandes y ágiles felinos, que pueden tender emboscadas ocultos entre los herbazales altos, la talla de *T. rex* delataba su presencia con facilidad. Con una ventaja de partida y su anatomía de fondista, el dinosaurio de pico de pato podía poner tierra de por medio.

—David Godkin



CORTESÍA DE NIROOT PUTTAPIPAT

QUÍMICA

Confirmada la existencia de un nuevo tipo de enlace químico

Una de las leyes de la química dicta que la velocidad de una reacción aumenta con la temperatura. En 1989, sin embargo, los investigadores se quedaron de una pieza al observar, en un acelerador nuclear de Vancouver, que cierta reacción entre bromo y muonio (análogo a un isótopo de hidrógeno) se desaceleraba a medida que elevaban la temperatura.

Donald Fleming, químico de la Universidad de la Columbia Británica y uno de los investigadores que participó en el experimento, pensó que, al combinarse, el bromo y el muonio tal vez formasen una estructura intermedia sostenida por un «enlace vibracional», un enlace hipotético propuesto pocos años atrás. En este, el átomo de muonio oscilaría repetidamente entre los dos átomos de bromo, como una pelota de ping-pong que rebotase entre dos bolas de bolos. Ello haría que la energía vibracional del conjunto disminuyese y la velocidad de la reacción se viera alterada.

En aquella época no existían los medios técnicos necesarios para estudiar con detalle una reacción de pocos milisegundos. Pero esa situación ha mejorado durante los últimos veinticinco años, por lo que, hace tres, Fleming y otros colaboradores repitieron el experimento en el acelerador nuclear del Laboratorio Rutherford-Appleton, en Inglaterra. Ahora, a partir de los datos de ambos experimentos y el trabajo de varios químicos teóricos de la Universidad Libre de Berlín y la Universidad de Saitama, en Japón, los investigadores han llegado a la conclusión de que, en efecto, el muonio y el bromo forman un nuevo tipo de enlace efímero.

La clave de este fenómeno se halla en una inusual redistribución interna de la energía. Parte de la energía vibracional inicial se convierte en energía traslacional del conjunto, aunque de una forma particular: los dos átomos de bromo permanecen casi estáticos y el de muonio oscila rápidamente entre ellos. Esa disminución de la energía vibracional es lo que provoca la desviación del comportamiento típico de la velocidad de reacción respecto de la temperatura.

Los resultados, publicados el pasado mes de diciembre en *Angewandte Chemie International Edition*, confirman la necesidad de añadir esta nueva clase de enlace —por efímera que sea— a la lista de enlaces químicos conocidos.

—Amy Nordrum



PETER A. KEMMER, GETTY IMAGES (*ojo*); ANDONI CANELA (*Ártico*)

SALUD

Alerta anticipada del alzhéimer

Uno de cada nueve estadounidenses mayores de 65 años sufre la enfermedad de Alzheimer, un trastorno neurodegenerativo sin cura ni tratamiento eficaz. Este podría llegar en forma de nuevos medicamentos, pero algunos expertos sospechan que los ensayos farmacológicos han fracasado hasta ahora porque los compuestos se ensayan en fases demasiado avanzadas de la enfermedad. Para cuando el enfermo muestra los primeros signos de demencia, el cerebro ya ha perdido neuronas. Ningún tratamiento puede revivir las células muertas y poco se puede hacer por crear nuevas.

Así que cuando diseñan un ensayo, los investigadores buscan participantes que todavía presenten un estado cognitivo normal pero se hallen al borde de la enfermedad. Estos pacientes «preclínicos» de alzhéimer podrían tener la oportunidad de recibir una intervención terapéutica. Pero el quid de la cuestión radica en identificar a estos individuos antes de la aparición de los síntomas.

Hoy, la mayoría de los afectados son diagnosticados después de una evaluación minuciosa y pruebas exhaustivas para estimar la función mental. Otras pruebas, como el análisis del líquido cefalorraquídeo y la tomografía por emisión de positrones (TEP), detectan signos de la enfermedad incipiente y ayudan a determinar el estado preclínico, pero son incómodas o caras. «No disponemos de un método asequible, incruento y rápido que permita identificar a las personas con riesgo de sufrir alzhéimer», explica Brad Dolin, director técnico de Neurotrack en Palo Alto, California, una empresa que está desarrollando una prueba de detección ocular informatizada para el alzhéimer.

A diferencia de otras pruebas cognitivas, la de Neurotrack no recurre al lenguaje ni a las habilidades motoras. Los participantes miran imágenes en un monitor mientras una cámara sigue el movimiento de sus ojos. La valoración se basa en la investigación del cofundador Stuart Zola, de la Universidad Emory, que estudia el aprendizaje y la memoria en los primates. Cuando se les presenta dos imágenes, una nueva y otra conocida, los monos fijan más tiempo la mirada en la primera. Pero si el hipocampo está dañado, como sucede en los enfermos de alzhéimer, no muestran una preferencia clara por las imágenes novedosas.

Los hallazgos parecen confirmarse en las personas. En un estudio publicado en 2013, Zola y sus colaboradores aplicaron la prueba, de media hora de duración, a 92 ancianos. Las puntuaciones predijeron con tres años de antelación quién contraería alzhéimer. La empresa ha desarrollado desde entonces una prueba virtual de cinco minutos con *webcam*, y este invierno ha iniciado un estudio de tres años en el que participarán hasta 3000 ancianos de Shanghái. Otras investigaciones en EE.UU. compararán la prueba visual con la TEP y otras medidas del alzhéimer preclínico. Y diversos laboratorios farmacéuticos la incluirán en ensayos clínicos de tratamientos contra el trastorno en los próximos años, según la directora de Neurotrack Elli Kaplan. Expertos ajenos a la empresa lo califican como un método prometedor, puesto que cuenta con «una base sólida, avalada por los datos publicados», en palabras de Peter Snyder, de la Universidad Brown.

A la vez, se están desarrollando otros métodos sencillos para detectar el alzhéimer presintomático, como los análisis de sangre, el escáner retiniano y las pruebas cognitivas informatizadas. No está claro cuál será el más fiable y los médicos probablemente recurrirán a varios de ellos para valorar la progresión de la enfermedad.

—*Esther Landhuis*

AGENDA

CONFERENCIAS

2 de febrero
Breve historia de la luz
Xavier Roqué, Centro de Historia de la Ciencia (UAB)
Biblioteca Les Corts-Miquel Llongueras
Barcelona
Ciclo «Visiones de la ciencia. El año de la luz»
www.bcn.cat/biblioteques > Actividades

17 de febrero
Transbordadores espaciales: Disfrutar de los éxitos y aprender de los fracasos
Vladimir Zaiats, Universidad de Vic
Agrupación Astronómica de Osona
Vic
http://astroosona.net/blog

26 de febrero
¿Y después del Higgs, qué?
Antonio Pich Zardoya, Universidad de Valencia
Fundación Ramon Areces, Madrid
www.fundacionareces.es

EXPOSICIONES

Hasta el 12 de febrero
El Ártico se rompe
Plaza de la Libertad, Reus
http://obrasocial.lacaixa.es > Exposiciones itinerantes



Ciencia en el Renacimiento
Biblioteca de la Universidad de Zaragoza
Zaragoza
http://biblioteca.unizar.es/exposiciones/renacimiento

OTROS

4 de febrero – Jornada
¿Cómo podemos estimular a los jóvenes a estudiar ciencias?
Cosmocaixa, Barcelona
http://obrasocial.lacaixa.es

10 de febrero – Café científico
Yo soy yo y mis adyacencias. El caso Facebook y la teoría de grafos
Clara Isabel Grima, Universidad de Sevilla
Ciclo CienciaMerçi
La Mercería Café Cultural
Sevilla
http://canalciencia.us.es

FÍSICA CUÁNTICA

El teorema de Kochen-Specker llega al laboratorio

Cincuenta años después de que John Bell formulase sus célebres desigualdades, la demostración empírica de un teorema complementario restringe aún más la posibilidad de interpretar los fenómenos cuánticos en términos de variables ocultas

ADÁN CABELLO

La teoría cuántica probablemente sea la construcción científica más exitosa de todos los tiempos. No solo todas sus predicciones han sido verificadas en el laboratorio con un detalle sin precedentes, sino que posee una sencillez y una austeridad matemática increíbles. Pero, sobre todo, la física cuántica ha cambiado nuestra forma de entender el universo. Por ejemplo, ha desterrado la idea de que los resultados de los experimentos estén predeterminados.

Al contrario de lo que sugiere nuestra intuición clásica, la teoría cuántica establece que un sistema físico no posee propiedades bien definidas hasta que estas no se miden. En 1967, Simon Kochen, entonces en Cornell y ahora en la Universidad de Princeton, y el ya fallecido Ernst Specker, por entonces en el Instituto Politécnico de Zúrich, demostraron matemáticamente hasta qué punto esa intuición clásica resultaba incompatible con las predicciones de la teoría cuántica. Sin embargo, y a pesar del tiempo transcurrido, la primera verificación empírica de su teorema solo pudo llevarse a cabo hace poco. Una vez más, los resultados empíricos han confirmado las predicciones de la teoría cuántica y han puesto de manifiesto la dificultad para interpretarla en términos de variables ocultas (variables deterministas, o «clásicas»).

Contextos cuánticos

Hace ahora 50 años, John Bell demostró que ninguna teoría de variables ocultas locales podía reproducir las predicciones cuánticas relativas a estados entrelazados; es decir, estados de al menos dos partículas preparadas de antemano de cierta manera. El teorema de Kochen-Specker complementa el resultado de Bell, ya que demuestra que la imposibilidad de reproducir las predicciones cuánticas mediante variables ocultas no se circunscribe a sistemas entrelazados, sino que ocurre también en sistemas individuales y con independencia de cómo preparemos el estado cuántico.

La hipótesis que Kochen y Specker demostraron incompatible con las predicciones cuánticas es que el resultado de un experimento esté predeterminado y sea independiente de qué otros experimentos se hagan simultáneamente. Esta hipótesis recibe el nombre de «no contextualidad». Un «contexto» denota un conjunto de experimentos cuyos resultados tienen probabilidades bien definidas con independencia de en qué orden se hagan.

Kochen y Specker observaron que existen conjuntos de experimentos elementales, con posibles resultados 1 y 0 (que representan, respectivamente, las respuestas «sí» y «no» a la pregunta formulada en el experimento), a los que, con independencia del estado en que esté preparado el sistema físico, es imposible asignar un resultado (1 o 0) de manera que se cumplan dos reglas básicas:

(i) Los resultados de dos experimentos elementales excluyentes no pueden ser ambos 1 (como sucede con las preguntas «¿es primavera?» y «¿es verano?»).
(ii) Los resultados de un conjunto exhaustivo de experimentos elementales y excluyentes dos a dos han de ser 1 en uno de los experimentos y 0 en todos los demás (como ocurre con las preguntas «¿es primavera?», «¿es verano?», «¿es otoño?», «¿es invierno?»).

Los conjuntos de experimentos elementales en los que resulta imposible hacer dicha asignación de resultados reciben el nombre de conjuntos de Kochen-Specker (KS). Su existencia demuestra que el universo no admite descripciones que cumplan la hipótesis de no contextualidad.

¿Conjuntos mínimos?

El conjunto original propuesto por Kochen y Specker constaba de 117 experimentos elementales sobre un sistema cuántico de dimensión 3, los cuales daban lugar a 118 contextos. Durante muchos años, los conjuntos de KS no pasaron de ser una curiosidad teórica. Nadie pensó en trasladarlos al laboratorio, pues resultaban demasiado complicados y no se sabía que pudieran tener aplicación práctica alguna.

En 1996, junto con José Manuel Estebaranz y Guillermo García Alcaine, de la Universidad Complutense de Madrid, encontramos un conjunto de KS mucho más simple que el original. Aún hoy, se trata del conjunto de KS con el menor número de experimentos elementales conocido: 18. Tales experimentos corresponden a preguntas sobre un sistema de dimensión 4 y dan lugar a 9 contextos. Sobre este conjunto, Mladen Pavičić, de la Universidad de Zagreb, escribió que era asombroso que hubiese sido descubierto «por humanos» y no por ordenadores.

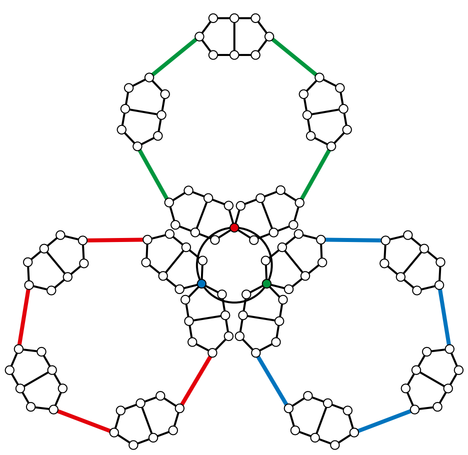
Fue la sencillez de dicho conjunto la que, años más tarde, permitiría llevar el teorema de Kochen-Specker al laboratorio. En 2013, un equipo formado por investigadores de la Universidad de Estocolmo, La Sapienza de Roma y la Universidad de Sevilla logramos comprobar empíricamente cómo las respuestas a las 18 preguntas del experimento violaban, tal y como predice la teoría cuántica, cierta desigualdad que debería cumplir cualquier teoría no contextual. Hicimos el experimento dos veces, usando cada vez un sistema físico distinto: primero, con la polarización y dos modos espaciales de fotones individuales; después, con la polarización y dos estados del momento angular orbital de fotones individuales.

La búsqueda de otros conjuntos de KS simples no se detuvo ahí. El año pasado, junto con Petr Lisoněk, de la Universidad Simon Fraser en Burnaby, Canadá, Piotr Badziąg, de la Universidad de Estocolmo, y José Ramón Portillo, de la Universidad

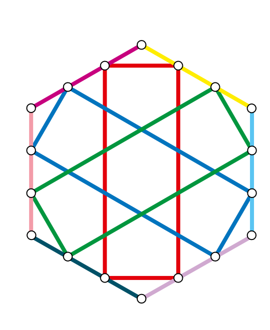
CONJUNTOS DE KOCHEN-SPECKER

En 1967, Simon Kocher y Ernst Specker demostraron matemáticamente que la mecánica cuántica resulta incompatible con cualquier teoría basada en variables ocultas «no contextuales». Estas últimas parten de dos premisas que, desde un punto de vista clásico, parecen irrenunciables: que las propiedades de un sistema físico se encuentran bien definidas antes de medirlas, y que son independientes del conjunto de experimentos que llevemos a cabo para determinarlas. En este ámbito, un «contexto» denota un conjunto de experimentos cuyos resultados tienen probabilidades bien definidas con independencia del orden en que se hagan.

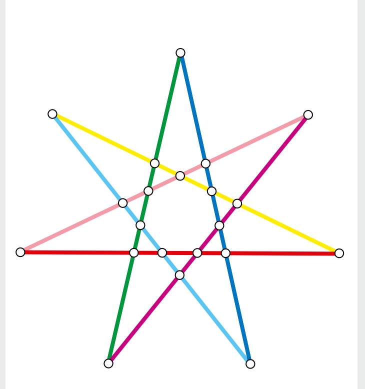
Esa incompatibilidad entre la mecánica cuántica y las teorías no contextuales se hace manifiesta en los conjuntos de Kochen-Specker (KS, *abajo*): combinaciones intrincadas de experimentos elementales (con resultados posibles 1 y 0, o «sí» y «no») en las que las predicciones de la primera difieren de las de las segundas. Hace poco, un conjunto de KS consiguió llevarse a la práctica por primera vez en un laboratorio.



El conjunto original de Kochen y Specker constaba de 117 experimentos elementales y 118 contextos. Aquí, cada experimento elemental queda representado por un nodo. Los nodos que se encuentran en una misma recta o en la circunferencia conforman un contexto. El experimento asociado al nodo rojo pertenece a 9 contextos: el representado por la circunferencia, 4 contextos indicados por segmentos negros y los 4 correspondientes a los segmentos rojos. Una relación análoga se aplica a los nodos verde y azul.



En 1996, el autor y otros colaboradores encontraron un conjunto de KS mucho más simple que el original. Compuesto por 18 experimentos (*nodos*) y 9 contextos (*colores*), se trata del conjunto de KS con el menor número de experimentos elementales conocido. Gracias a ello, hace poco fue posible implementarlo en el laboratorio.



Este diagrama muestra el conjunto de KS con el menor número de contextos conocido hasta la fecha. Hallado el año pasado, cuenta con 21 experimentos elementales (*nodos*) y 7 contextos (*colores*).

de Sevilla, dimos un paso más y hallamos el conjunto de KS con el menor número de contextos conocido: 7. Una vez más, los humanos nos hemos adelantado a los ordenadores. Es más, en este caso, el conjunto se encuentra en el límite de lo que los ordenadores actuales pueden encontrar mediante una búsqueda exhaustiva: 21 experimentos elementales sobre un sistema de dimensión 6.

Curiosamente, las búsquedas con ordenador parecen indicar que los dos conjuntos de KS que acabamos de describir contienen, respectivamente, el menor número de experimentos elementales y el menor número de contextos posibles.

La sencillez de estos conjuntos de KS ha animado a explorar nuevas aplicaciones y experimentos. Ahora sabemos que los conjuntos de KS cuentan con aplicaciones en criptografía y comunicación cuánticas. Sirven también para certificar que nuestros aparatos de medida están accediendo a sistemas cuánticos de cierta dimensión, y que lo hacen sin necesidad de preparar uno o varios estados cuánticos específicos. Por ejemplo, en un reciente experimento en la Universidad de Concepción, en Chile, hemos usado el conjunto de KS de 7 contextos para certificar que los aparatos de medida acceden a un sistema cuántico concreto de dimensión 6.

Resulta estimulante ver cómo lo que hasta hace poco se consideraba un intrincado pasatiempo matemático se está convirtiendo en una herramienta práctica para la investigación básica.

—Adán Cabello
Universidad de Sevilla

PARA SABER MÁS

Experimental implementation of a Kochen-Specker set of quantum tests. Vicenzo D'Ambrosio et al. en *Physical Review X*, vol. 3, n.º 1, pág. 011012, 14 de febrero de 2013.

Kochen-Specker set with seven contexts. Petr Lisoněk et al. en *Physical Review A*, vol. 89, n.º 4, pág. 042101, 1 de abril de 2014.

Applying the simplest Kochen-Specker set for quantum information processing. Gustavo Cañas et al. en *Physical Review Letters*, vol. 113, n.º 9, pág. 090404, 28 de agosto de 2014.

Guinea
Activo (diagrama de barras de la esquina inferior derecha)
1 Costa de Marfil
Brotes según la ubicación del primer caso; el tamaño del círculo indica el número de personas infectadas
Sudán del Sur
284
17
34
318
1
425
12
31
49 124
República del Congo
60
Gabón
35
143
República Democrática del Congo
36
116 11 6 Uganda
1
315
264
32
66 (datos preliminares, 11 de agosto-9 de octubre de 2014)

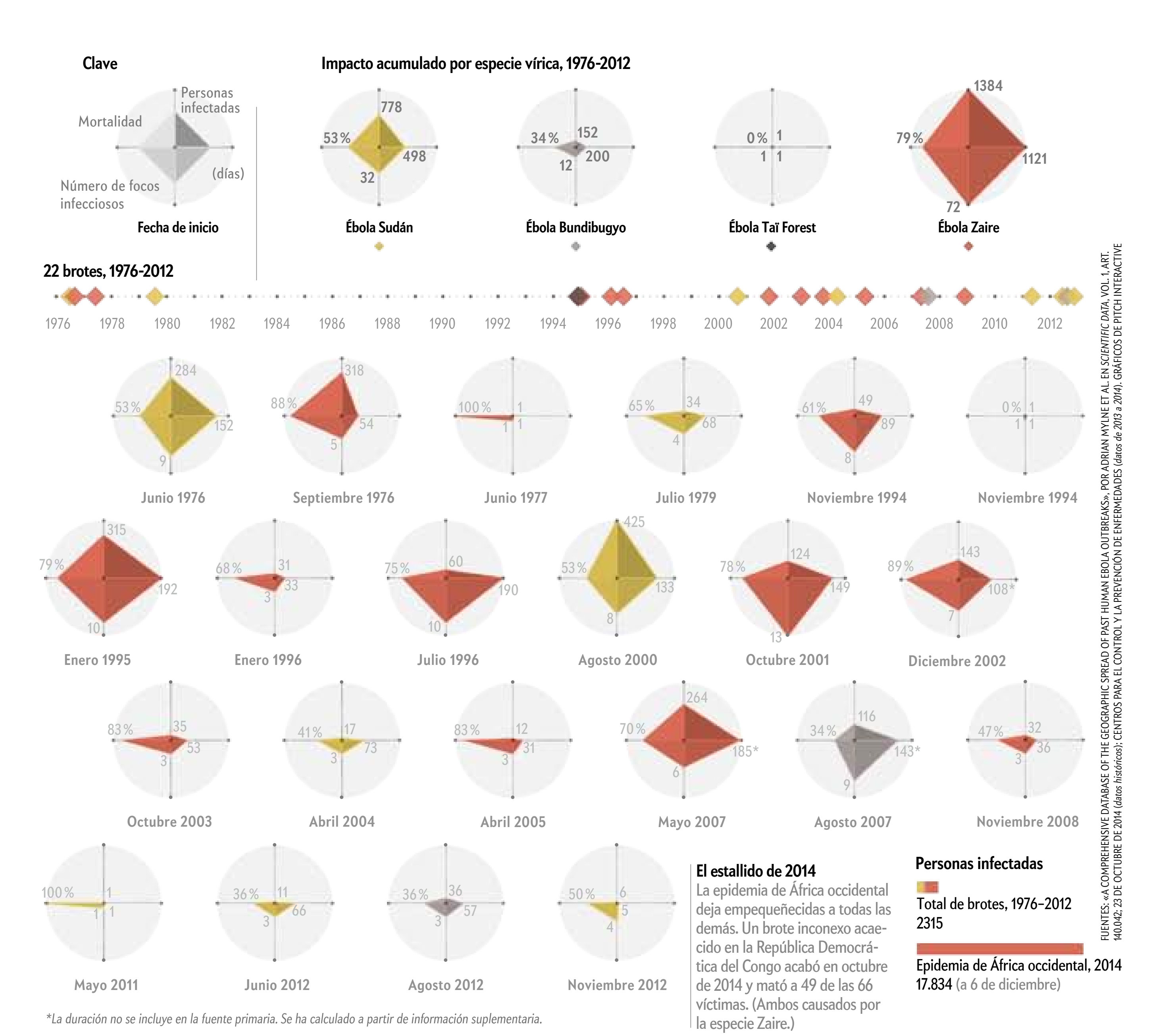
EPIDEMIAS

El auge incesante del ébola

Los brotes han sido numerosos e impredecibles

MARK FISCHETTI

La crisis del ébola desatada en África occidental es el mayor brote conocido del virus, pero no el primero —es el 23.º desde la aparición de la enfermedad en 1976 (*véanse a continuación los polígonos*). El azote comenzó en Guinea, lejos de los primeros casos (*mapa*) y es, con mucho, el mayor (*esquina inferior derecha*). Este análisis histórico de los brotes llevado a cabo por investigadores de la Universidad de Oxford demuestra que la mortalidad ha superado el 33 por ciento y que es frecuente la aparición de varios focos infecciosos al mismo tiempo, porque los infectados se trasladan en busca de tratamiento o viajan por otros motivos. Los expertos temen que, sin un esfuerzo generalizado y enérgico para detectar y erradicar los nuevos brotes en cuanto emerjan, el virus acabará convirtiéndose en un peligro permanente para la salud, que podría estallar de manera impredecible en África y en el resto del mundo.



*La duración no se incluye en la fuente primaria. Se ha calculado a partir de información suplementaria.

ENERGÍA

El lado humano del problema energético

Las investigaciones sobre energía adolecen de un enfoque excesivamente centrado en la técnica y la economía. Una mayor cabida a las ciencias sociales permitiría entender mejor la manera en que el comportamiento humano afecta a la demanda energética y a la asimilación de la tecnología

BENJAMIN K. SOVACOOL

Para garantizar un futuro energético seguro, fiable y menos dependiente del carbono, habremos de cambiar no solo nuestra tecnología, sino también nuestros hábitos. El Departamento de Energía estadounidense ha apuntado al respecto que la oferta y la demanda se ven afectadas por «los hábitos, las preferencias y las elecciones individuales tanto como por el rendimiento técnico».

Sin embargo, numerosos investigadores y líderes políticos continúan centrándose en un solo aspecto del problema energético. En EE.UU., por cada dólar que se destina a la investigación energética desde la perspectiva conductual y de la demanda se invierten 35 en infraestructura y suministro. Las ciencias sociales, las humanidades y las artes se encuentran, en este sentido, marginadas. Y, por norma general, las principales agencias demoscópicas no recopilan datos cualitativos sobre el consumo energético. Problemas similares se advierten también en Europa.

En fecha reciente he analizado un gran número de artículos publicados en revistas especializadas con revisión por pares. Dicho estudio, publicado en *Energy Research & Social Science*, ha puesto de relieve cuán perjudiciales resultan estos sesgos. Los ingenieros y los economistas están ignorando a las personas y otorgando un papel inapropiado a las acciones y a la toma de decisiones. Con frecuencia, los investigadores se centran mucho más en las cuestiones técnicas que en las posibilidades de modificar el estilo de vida y las normas sociales. Las colaboraciones interdisciplinares se ven obstaculizadas por barreras institucionales, tanto académicas como gubernamentales. Los organismos energéticos locales y nacionales no suelen contratar a investigadores sociales. Y las revistas especializadas más destacadas se centran en una sola disciplina.

El campo de la energía debería tomar nota de áreas como la sanidad, la agricultura y las finanzas, y promover la integración de ciencias sociales y naturales. Las universidades tendrían que ofrecer cursos enfocados a resolver problemas energéticos; las agencias de financiación habrían de destinar más fondos a los estudios conductuales, y las revistas del ramo bien podrían ampliar su ámbito. Varios ejemplos prometedores muestran hasta qué punto una investigación interdisciplinar e integradora puede estimular la eficiencia energética y, con ello, ayudar a afrontar retos globales como el cambio climático.

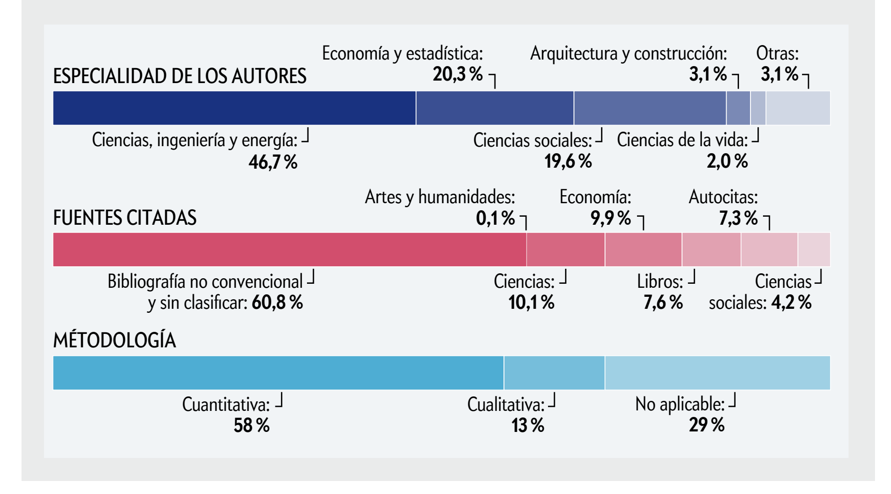
En mi estudio examiné la autoría y el alcance de 4444 artículos publicados durante 15 años (entre 1999 y 2013) en tres destacadas revistas de tecnología y política energéticas: *Energy Policy* y *The Energy Journal*, que cuentan con altos índices de impacto, y *The Electricity Journal*, que se incluyó como muestra de revista sobre normativa. Hallé cuatro tendencias preocupantes: una infravaloración de la influencia que ejercen los aspectos sociales en el uso de la energía; un sesgo hacia las ciencias naturales, la ingeniería y la economía en detrimento de las humanidades y las ciencias sociales; una carencia de colaboraciones interdisciplinares, y una baja representación de mujeres y autores pertenecientes a grupos minoritarios.

Así, la adopción de tecnología, la complejidad de los procesos de toma de decisiones y la dimensión humana de cuestiones como el uso energético o el cambio ambiental se trataron en contadas ocasiones. El 85 por ciento de los artículos se centraban en sistemas avanzados de producción energética (reactores nucleares, fuentes de electricidad renovable y biocombustibles) o en los aspectos técnicos de la generación, transmisión y distribución de la electricidad; es decir, más en el *hardware* que el «*software* humano» que se encuentra detrás. Los aparatos simples, como hornos de cocina, bicicletas, bombillas o generadores distribuidos se estudiaban en menos del 3,5 por

TENDENCIAS

ENFOQUE TÉCNICO

Un análisis de los artículos sobre energía publicados entre 1999 y 2013 en tres grandes revistas ha revelado que tales estudios suelen poner mucho más énfasis en las cuestiones técnicas que en las humanas. Esta tendencia se refleja en la formación de los autores, las referencias bibliográficas y los métodos empleados.



FUENTE: B. K. SOVACOOL EN *ENERGY RESOURCE SOCIAL SCIENCE*, N.º 1, PÁGS. 1-29, 2014

ciento de los artículos, mientras que las investigaciones sobre demanda energética y conducta no superaban el 2,2 por ciento. Y, si tales trabajos acaban publicándose, lo hacen en revistas de sociología ambiental, psicología y teoría política, muy poco leídas por quienes investigan en cuestiones energéticas.

Marginados sociales

Tanto el número de autores pertenecientes al ámbito de las ciencias sociales como las citas que estos reciben se encuentran en una proporción relativamente baja. Las ciencias naturales, la ingeniería, la economía y la estadística daban cuenta de más de la mitad (el 67 por ciento) de las afiliaciones institucionales de los firmantes. Frente a ello, las ramas sociales ajenas a la economía apenas suponían el 20 por ciento. La sociología, la geografía, la historia, la psicología, las ciencias de la comunicación y la filosofía representaban, cada una de ellas, menos del 0,3 por ciento de las afiliaciones de los autores.

Las referencias bibliográficas a revistas de humanidades y ciencias sociales, que permiten entender mejor el comportamiento de políticos y consumidores, no llegaban al 4,3 por ciento de las 90.097 citas incluidas en la muestra. Poco se ha investigado en el «mundo real»: la mayoría de los estudios se basan en simulaciones informáticas y experimentos de laboratorio, en detrimento de las investigaciones de campo, las entrevistas y las encuestas.

Los científicos e ingenieros que escriben en las revistas mencionadas rara vez colaboran con expertos de otras especialidades. De los autores incluidos en la muestra, en torno a la mitad firmaron sus artículos en solitario, y una cuarta parte lo hizo con investigadores de su misma disciplina. Menos del 23 por ciento de los trabajos eran fruto de colaboraciones interdisciplinares.

Por otro lado, la inmensa mayoría de los autores reciben fondos de instituciones occidentales acaudaladas y de países en los que no escasean los recursos para la investigación. Como consecuencia, se centran en los problemas a los que se enfrenta el mundo industrializado. En la muestra analizada, el 87 por ciento de los 9549 autores que indicaron su país de residencia procedían de Norteamérica o Europa occidental. Los firmantes radicados en África, Asia, Latinoamérica u Oriente Medio escaseaban. Por lo demás, los autores eran en su mayoría hombres; solo un 15,7 por ciento pudieron ser identificadas como mujeres. Aunque sí se observaron cambios en otras pautas de autoría y colaboración, estas dos tendencias se mostraron constantes en todos los años examinados: las firmas femeninas nunca superaron el 17,4 por ciento, y los autores no occidentales siempre se mantuvieron por debajo del 16 por ciento.

Cinco recomendaciones

A fin de integrar a científicos sociales y a otros investigadores hasta ahora marginados, propongo cinco medidas.

Primero, las organizaciones públicas y privadas deberían revisar la manera en que estructuran y distribuyen los fondos destinados a la investigación y el desarrollo energéticos. Habría que conceder una cuota mayor a los expertos de áreas sociales, incentivar el trabajo interdisciplinar y promover convocatorias que prioricen temas sociales como la percepción de los usuarios, las necesidades de quienes se ven afectados por la producción de la energía o el estudio de los hábitos, tradiciones y conductas predominantes.

En segundo lugar, y a fin de reducir el sesgo disciplinar, los ministerios de energía, las agencias demoscópicas y las comisiones de servicios públicos deberían centrarse no solo en el suministro, sino también en la conducta y la demanda energéticas. En EE.UU., el estado de Delaware y el distrito de Columbia han creado un servicio de energía sostenible que aconseja a la población sobre cómo cambiar sus hábitos para ahorrar energía y dinero. Efficiency Vermont, un servicio de eficiencia energética, orienta y financia a hogares, granjas e industrias.

Tercero, gerentes y administradores deberían reorientar las investigaciones energéticas hacia la resolución de problemas, incluyendo las perspectivas sociales como algo habitual. Las universidades tendrían que elaborar cursos específicos sobre energía similares a los que ya se imparten sobre investigación agrícola, medicina y negocios. Dichos programas podrían incluir aspectos como el consumo sostenible y eficiente, la gestión de riesgos, la toma de decisiones o el diseño de tecnologías que sean aceptadas y usadas por la población. Existen buenos ejemplos de ello: la Universidad de Edimburgo oferta un máster interdisciplinar

TEMAS IGNORADOS

Doce puntos que rara vez se contemplan en los estudios sobre energía.

Tema	Ejemplo
Género e identidad	La contaminación derivada de los hornos de cocina, que afecta en mayor medida a las mujeres que a los hombres
Filosofía y ética	La contaminación a la que habrán de hacer frente las generaciones futuras
Comunicación y persuasión	La manera en que la información sobre energía induce cambios en la conducta de personas y empresas
Geografía y escala	Asimetrías entre la capacidad de los sistemas energéticos y la demanda
Psicología social y conducta	Cómo moldear decisiones relativas a la energía a través de la confianza, el control o el rechazo
Antropología y cultura	Diferencias temporales y regionales en la concepción de los servicios energéticos
Investigación e innovación	El modo en que personas, mercados e instituciones responden a la innovación
Política y economía política	Cómo los recursos desencadenan conflictos o frenan el crecimiento
Instituciones y gobernanza energéticas	Normas y regulaciones destinadas a abordar los problemas energéticos colectivos
Energía y desarrollo	La manera en que el uso de la energía promueve el crecimiento económico y la reducción de la pobreza
Externalidades y contaminación	Coste social de la erosión del capital ecológico y ambiental
Sociología de la tecnología	Qué factores sociales, políticos y económicos impulsan el consumo energético

FUENTE: ADAPTADO DE B. K. SOVACOOL EN *ENERGY RESOURCE SOCIAL SCIENCE*, N.º 1, PÁGS. 1-29, 2014

en contabilidad climática; la Universidad de Aarhus, en Dinamarca, imparte un grado de desarrollo empresarial que combina ingeniería y estudios sobre innovación, energía, economía y mercadotecnia, y la Universidad Carnegie Mellon cuenta con un departamento de ingeniería y políticas públicas. Fuera del ámbito académico, la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados para la Defensa, en EE.UU., viene aplicando con éxito un enfoque «centrado en retos» a los problemas de seguridad nacional desde su creación, en 1958.

Como cuarta medida, los investigadores deberían esforzarse por dar cabida a la experiencia y a los datos procedentes de grupos autóctonos, líderes comunitarios y otras personas legas en la materia. Aunque puede que este objetivo requiera una formación especial si se desea llevar a la práctica de manera efectiva, tales interacciones fomentarían una respuesta mayor e integrarían puntos de vista diversos.

Por último, los editores de las revistas técnicas podrían priorizar una investigación interdisciplinar, integradora, comparativa y basada en métodos mixtos. *Energy Research & Social Science*, una nueva revista publicada por Elsevier y de la que soy redactor jefe, solicita de forma explícita artículos que combinen conceptos de distintas disciplinas, que trasciendan los casos de estudio aislados y que recurran a una variedad de métodos. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment* también pide análisis multidisciplinares de sistemas energéticos.

El campo de la energía debe abrirse a las ciencias sociales y adoptar un enfoque más heterogéneo. Una investigación enfocada a resolver problemas, que se centre tanto en los procesos físicos como en los sociales, que incluya a actores diversos y que combine métodos cuantitativos y cualitativos gozará de más oportunidades para lograr la excelencia analítica y un mayor impacto social.

—Benjamin K. Sovacool
Centro de Tecnologías Energéticas de la Universidad de Aarhus
Dinamarca
Escuela de Derecho de Vermont
EE.UU.

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 511, págs. 529-530, 2014. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2014

PARA SABER MÁS

What's the state of energy studies research? A content analysis of three leading journals from 1999 to 2008. A. L. D'Agostino et al. en *Energy*, vol. 36, págs. 508-519, 2011.
Tackling long-term global energy problems: The contribution of social science. Dirigido por D. L. Goldblatt et al. Springer, 2012.
What are we doing here? Analyzing fifteen years of energy scholarship and proposing a social science research agenda. B. K. Sovacool en *Energy Research & Social Science*, vol. 1, págs. 1-29, 2014.

MICROBIOLOGÍA

Guía para interpretar con escepticismo las investigaciones sobre el microbioma

Cinco cuestiones clave para no caer en el sensacionalismo científico

WILLIAM P. HANAGE

Los estudios acerca de las comunidades microbianas del cuerpo humano y de su influencia sobre la salud y la enfermedad han pasado de la oscuridad a la omnipresencia. A lo largo del último lustro, las investigaciones han vinculado nuestros colonos microscópicos con enfermedades tan variopintas como el autismo, el cáncer o la diabetes.

Todo ese revuelo ha inflamado la imaginación del público. «Somos nuestras bacterias», llegó a pregonar *The New York Times* en un titular de su blog *Well*. Algunos expertos se atreven a afirmar que los antibióticos están causando una «extinción» masiva del microbioma de nefastas consecuencias para la salud humana. Empresas privadas ofrecen análisis personalizados del contenido microbiano de las heces y prometen a los consumidores información esclarecedora, obviando el hecho de que análisis independientes de la misma muestra pueden arrojar diferencias notables. Se han llegado a proponer trasplantes de heces —unos más sensatos que otros— para tratar afecciones que van de la diabetes al alzhéimer. Y ante la proliferación en la red de «instrucciones de uso», se hace patente la urgencia de advertir a los pacientes desesperados del riesgo que entrañan esos procedimientos temerarios.

La microbiómica corre el riesgo de perecer ahogada en la ola de sensacionalismo que ella misma ha desatado. Jonathan Eisen, microbiólogo y bloguero de la Universidad de California en Davis, otorga premios por «ensalzar las virtudes del microbioma» y no anda escaso de dignos candidatos.

Las disciplinas «ómicas» que la preceden han vacilado a causa de trabajos turbios que han frenado los progresos. Los avances técnicos que han permitido catalogar proteínas, metabolitos, variantes genéticas y actividades de genes han generado un torrente de asociaciones entre estados moleculares y trastornos de la salud, pero la ingente labor que supone su estudio en profundidad ha enfriado el entusiasmo inicial. La mayoría de las conexiones iniciales han devenido falsas o, en el mejor de los casos, más complejas de lo que se pensó en un principio.

La historia de la ciencia está plagada de ejemplos de nuevas disciplinas que prometieron una «cornucopia» de fármacos y avances médicos que el escepticismo y años de trabajo afanoso se han encargado de desmentir, al menos en parte. Como tales, los criterios para hacer de la ciencia del microbioma una disciplina fundamentada resultan instructivos para cualquier investigador. Toda vez que el entusiasmo en torno al microbioma ha trascendido ya los círculos académicos, el perjuicio que pueden acarrear los malentendidos compete a los periodistas, las entidades financiadoras y el público.

Preguntas críticas

Presentamos a continuación cinco preguntas que todo aquel que lleve a cabo o valore estudios de esta nueva disciplina debería formularse para no dejarse llevar por el sensacionalismo:



EL ENTUSIASMO POR LA MICROBIÓMICA se hace visible más allá de los círculos académicos. Los estudios sobre el microbioma humano han protagonizado la portada de numerosas publicaciones no especializadas (incluida *Investigación y Ciencia*).

¿Han hallado los experimentos diferencias notables?

La caracterización del microbioma puede producir un catálogo de filos, especies o genes. Gran parte del trabajo se basa en el análisis del ARNr 16S, cuyo gen ancestral no tolera grandes variaciones y por esa razón se encuentra repartido a lo largo y ancho del reino bacteriano. El problema radica en que solo permite una clasificación burda. Por ejemplo, los microbiomas vinculados con la obesidad han sido caracterizados por relaciones particulares entre filos bacterianos, que abarcan un asombroso abanico de diversidad. Si ese mismo criterio se aplicara para caracterizar comunidades animales, un aviario de 100 aves y 25 caracoles sería considerado idéntico a un acuario con 8 peces y 2 calamares porque ambos contienen cuatro veces más vertebrados que moluscos. E incluso dentro de una misma especie, las distintas cepas suelen presentar grandes diferencias en su dotación génica.

Las técnicas modernas ofrecen análisis más refinados: podemos estudiar más genes en una muestra, lo cual permite descifrar «redes metabólicas» que revelan las reacciones bioquímicas que lleva a cabo un microbioma. Este tipo de análisis identificaría combinaciones de genes, probablemente de varias especies de la comunidad microbiana, que para bien o para mal influyen en la salud. Pero atribuir un resultado a una entidad particular probablemente sea difícil si las redes no están caracterizadas.

Tomemos un ejemplo de una especie bacteriana. En un trabajo publicado en 2013 en *Nature Genetics*, Nicholas J. Croucher, de la Escuela de Salud Pública de Harvard, y sus colaboradores demostraron que la vacunación había eliminado el 30 por ciento de las cepas de neumococos conocidas en una población humana. Pero ello fue posible porque de antemano sabían lo que buscar: los genes que constituyen la diana de la vacuna. Nuestra capacidad para detectar diferencias funcionales en genes muy afines no es lo bastante refinada como para extraer genes o redes importantes si no sabemos qué buscamos *a priori*. Además, los genomas están plagados de pistas verdaderas y falsas, tales como «proteínas hipotéticas» y genes poco o nada conocidos, pero que pueden generar diferencias importantes en lo que las redes metabólicas hacen.

Hemos de ser capaces de descubrir diferencias funcionales en genes estrechamente emparentados únicamente a partir de la secuencia. Hasta ese momento, tendremos que recordar que las apariencias engañan y que supuestas semejanzas pueden ocultar diferencias notables.

¿El estudio revela causalidad o mera correlación?

Esta pregunta surge cuando distintos microbiomas pueden identificarse y vincularse a enfermedades y trastornos. Entonces volvemos a la vieja historia de las causas y las correlaciones. A veces, la presencia de un microbioma asociado con una enfermedad es meramente accidental.

Un artículo publicado en 2012 en *Nature* por Marcus J. Claesson, del Colegio Universitario de Cork, y sus colaboradores comparó el microbioma intestinal de ancianos residentes en geriátricos con el de otros que vivían en domicilios. Los investigadores hallaron correlación entre ciertos microbiomas y múltiples indicadores de debilidad. Una vez descartados posibles factores de confusión, propusieron una relación causal: la alimentación altera el microbioma y este a su vez trastoca la salud. La explicación concuerda con los datos, pero no se estudió la causalidad inversa, la posibilidad de que el mal estado de salud altere el microbioma intestinal. Las personas de salud precaria tienen probablemente un sistema inmunitario menos activo y diferencias en la digestión (como el tiempo de tránsito de los alimentos por el estómago y el intestino), factores que pueden modificar el microbioma. Este trabajo no es el único ejemplo de este tipo de confusión.

¿Cuál es el mecanismo?

A todos los científicos se les infunde el catecismo de que la correlación no es causalidad. Pero la correlación casi siempre conlleva algún tipo de relación causal. Simplemente no sabemos lo que es, y es preciso averiguarlo con experimentos minuciosos.

En los últimos tres o cuatro años, las investigaciones han pasado de caracterizar una amplia comunidad compuesta mayoritariamente por microorganismos incultivables a identificar elementos funcionales, taxones específicos o propiedades concretas. Ahora es posible diseñar experimentos para definir las acciones de los componentes del microbioma, por ejemplo, reconstruyendo las comunidades sin taxones concretos o midiendo la actividad bioquímica de un microbioma experimental en un «chip orgánico». El retorno al enfoque reduccionista es esencial si queremos averiguar si el microbioma influye en la salud humana y saber de qué modo.

¿Hasta qué punto reflejan la realidad los experimentos?

Por mucho que el microbioma pueda tener un efecto experimental, no tiene por qué ser una causa importante de los síntomas de las personas enfermas.

Numerosos estudios han analizado el papel del microbioma (flora) intestinal en la obesidad y varios han descubierto relaciones entre esta comunidad de microorganismos y la ganancia de peso. Pensemos en el trabajo de Ruth E. Ley, de la Universidad Cornell, publicado en 2010 en *Current Opinion in Gastroenterology*. Para analizar si esta relación era una causa o una consecuencia, se tomaron muestras de la flora intestinal de parejas de gemelos en las que uno era obeso e introdujeron sus microbiotas en ratones. Los múridos inoculados con el microbioma «de obeso» adelgazaron cuando se les suministró el microbioma «de delgado», pero solo si seguían una dieta normal o hipocalórica. La alimentación por sí sola ejercía un efecto escaso. Aunque este experimento controlado parece revelar un gran potencial terapéutico del microbioma, también pone de manifiesto sus limitaciones: el efecto dependió de otros factores, en este caso, de la dieta.

Los estudios del microbioma suelen basarse en ratones sin gérmenes. Este tipo de roedores facilitan sobremanera la introducción de microbiotas experimentales, pero no representan en absoluto el estado natural, hasta el punto de que suelen sufrir problemas de salud por la carencia de microbioma. Así pues, es posible que los resultados no predigan la respuesta en los animales con microbiomas florecientes. El nicho ecológico de los ratones y de su microbioma es también bastante distinto del del ser humano, por lo que los resultados tal vez no sean extrapolables.

¿Los resultados podrían tener otra explicación?

Hay razones de peso para pensar que las bacterias influyen en nosotros de muy diversos modos. Pero existen muchas otras influencias —posiblemente más importantes—, como la alimentación en el ejemplo anterior. Siempre que un estudio vincule un microbioma con una enfermedad, lo más sensato es preguntar si se han tenido en cuenta otros factores condicionantes de esa enfermedad.

El bombo que envuelve el estudio del microbioma resulta contraproducente, tanto para la gente que por iniciativa propia podría tomar decisiones precipitadas, como para los científicos, que necesitan diseñar mejores métodos experimentales para generar hipótesis y evaluar los resultados. Los organismos de financiación no deberían tolerar que sus prioridades se vean tergiversadas por los rumores que rodean la disciplina, sino examinar los datos con serena objetividad. Los agentes de prensa deberían dejar de exagerar los resultados, y los periodistas, dejar de creer en ellos a pies juntillas. Antaño, cuando algo escapaba a la comprensión se achacaba a los espíritus. Hoy debemos resistir la tentación de convertir a nuestros inquilinos microbianos en fantasmas modernos.

—William P. Hanage
Escuela de Salud Pública de Harvard
Boston

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 512, págs. 247-248, 2014. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2014

PARA SABER MÁS

Obesity and the human microbiome. R. E. Ley en *Current Opinion in Gastroenterology*, vol. 26, págs. 5-11, 2010.
Gut microbiota composition correlates with diet and health in the elderly. M. J. Claesson et al. en *Nature*, vol. 488, págs. 178-184, 2012.
Probiotics in transition. F. Shanahan en *Nutrition Reviews*, vol. 70 (supl. 1), págs. S31-S37, 2012.
Gut microbiota from twins discordant for obesity modulate metabolism in mice. V. K. Ridaura et al. en *Science*, vol. 341, pág. 1241214, 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

El ecosistema microbiano humano. Jennifer Ackerman en *IyC*, agosto de 2012.
Nuestro segundo genoma. Fransico Guarner en *IyC*, diciembre de 2012.





ILUSTRACIONES DE BEN VOLDMAN

INNOVACIÓN



IDEAS QUE CAMBIAN EL MUNDO

Diez avances que impulsarán el progreso en los próximos años

Seth Fletcher

Podría argumentarse que predecir qué descubrimientos científicos cambiarán el mundo supone una pérdida de tiempo. ¿Quién sabe qué deparará el futuro? Sin embargo, cada año se producen unas cuantas innovaciones (por ejemplo, el desarrollo de la técnica de edición de genes más rápida y barata hasta la fecha) que nos entusiasman tanto que no podemos evitarlo. En la recopilación de este año [Investigación y ciencia viene publicando anualmente, desde 2011, un artículo que resume las ideas más innovadoras del momento], tales adelantos incluyen, entre otros, técnicas para reprogramar células vivas y para tornar transparentes animales de laboratorio; sistemas para alimentar aparatos electrónicos con ondas sonoras y con saliva; teléfonos inteligentes que corrigen los defectos de la vista, y estructuras atómicas similares a piezas de Lego que pueden dar lugar a importantes avances en la investigación de la superconductividad. Lea ahora acerca de ellos y preste atención en los próximos años a ver qué consiguen.

MEDICINA

LA EDICIÓN GENÉTICA, MÁS PRECISA

Una nueva técnica denominada CRISPR permite modificar el ADN a partir del sistema defensivo de las bacterias. Su aplicación podría revolucionar la medicina, pero hay quien teme sobre su uso incontrolado

Margaret Knox



LA ERA DE LA INGENIERÍA GENÉTICA comenzó en los años setenta, cuando Paul Berg cortó un fragmento de ADN procedente de un virus que infecta a bacterias y lo unió al ADN de un virus de mono. En ese mismo período, Herbert W. Boyer y Stanley N. Cohen crearon organismos en los que habían introducido genes que se mantenían activos durante generaciones. Hacia finales de los setenta, la compañía de Boyer, Genentech, producía insulina a gran escala a partir de la bacteria *Escherichia coli*, la cual albergaba un gen sintético humano. Y en laboratorios de todo el mundo ya se usaban de manera rutinaria ratones transgénicos para estudiar enfermedades.

Esos hitos cambiaron el curso de la medicina. Sin embargo, los métodos de aquella época presentaban dos grandes limitaciones: eran imprecisos y difíciles de aplicar a gran escala. El problema de la imprecisión se resolvió en los años noventa cuando se diseñaron unas proteínas que podían cortar el ADN en localizaciones específicas. Ello supuso un gran avance con respecto a las técnicas de inserción aleatoria de ADN que se usaban hasta entonces y que dependían de la suerte para generar una mutación útil. A pesar de este salto cualitativo, todavía se tenía que diseñar una proteína específica para cada secuencia de ADN que se deseara modificar, una tarea que resultaba lenta y complicada.

Esa realidad ha comenzado a cambiar hace solo tres años. Unos cuantos investigadores de los laboratorios de Emmanuelle Charpentier, en la Universidad de Umeå, y de Jennifer Doudna, en la Universidad de California en Berkeley, descubrieron un mecanismo celular que permitía modificar material genético con una facilidad y rapidez sin precedentes. Poco después, investigadores de la Universidad Harvard y del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) demostraron que esa estrategia podía servir para generar numerosos cambios en el genoma de una célula de forma coordinada y precisa.

En apenas dos años estos avances han impulsado la industria de la ingeniería genética y se espera que afecte muy positivamente a los campos de la genética y la medicina. Hoy es posible modificar animales de manera personalizada en cuestión de semanas, algo que hasta hace muy poco suponía años de trabajo. La técnica se está empleando también para buscar terapias contra enfermedades tan diversas como el sida, el alzhéimer o

EN SÍNTESIS

Los científicos saben modificar el genoma de organismos vivos desde los años setenta, pero las herramientas disponibles hasta ahora eran imprecisas y difíciles de aplicar a gran escala. En consecuencia, muchos experimentos resultaban complicados y costosos.

Ahora un nuevo método llamado CRISPR podría revolucionar la modificación genómica. Basada en la defensa inmunitaria de las bacterias, esta técnica es más rápida, barata y fácil que las antiguas. Las compañías que intentan comercializar los usos de CRISPR están recibiendo grandes inversiones.

Ya han comenzado a explorarse las posibilidades de tratamiento con CRISPR para enfermedades como el sida o la esquizofrenia. Pero el hecho de que resulte tan fácil modificar genomas con este método genera ciertas preocupaciones de carácter ético.



la esquizofrenia. Sin embargo, el hecho de que resulte tan fácil y barata ha levantado las alarmas en algunos comités éticos.

El método en cuestión recibe el nombre de CRISPR, siglas en inglés de «repeticiones palindrómicas cortas agrupadas y regularmente espaciadas», en referencia a las secuencias de reconocimiento que emplean las bacterias para «recordar» los virus que las han infectado. Estas secuencias genéticas tan particulares son objeto de estudio desde que un grupo de investigadores japoneses las descubriera a finales de los años ochenta. Sin embargo, la posibilidad de utilizar las CRISPR como herramientas de ingeniería genética no fue considerada hasta que Doudna y Charpentier, junto con sus respectivos equipos, describieron el mecanismo de una proteína llamada Cas9.

EL PODER DEL ARN

Doudna y Charpentier se conocieron en 2011 en una conferencia en San Juan, Puerto Rico. Tenían mucho en común. Ambas dirigían equipos que trataban de entender los mecanismos de

defensa de las bacterias contra las infecciones víricas. Y las dos habían publicado trabajos en los que confirmaban que las bacterias identifican a los virus al «recordar» el ADN de estos en ataques anteriores.

Poco después de la conferencia, Charpentier y Doudna decidieron unir sus esfuerzos. El laboratorio de Charpentier en Umeå había empezado a reunir pruebas de que las bacterias *Streptococcus* usaban una sola proteína, Cas9, para trocear el ADN de los virus que atravesaban sus paredes. Mientras, Doudna y su equipo se centraban en descifrar el mecanismo de Cas9.

Por uno de esos caprichos del destino que sustentan muchos descubrimientos científicos, resultó que Krzysztof Chylinski, del grupo de Charpentier, y Martin Jinek, por aquel entonces en el laboratorio de Doudna, se habían criado en ciudades vecinas y hablaban el mismo dialecto polaco. «Comenzaron a hablar a través de Skype, se hicieron amigos y empezaron a compartir datos y a discutir ideas sobre los experimentos», comenta Doudna. «Fue a partir de ese momento cuando el proyecto arraigó.»

Los investigadores de ambos laboratorios se dieron cuenta de que Cas9 podría utilizarse como una herramienta de edición genética, una estrategia de la ingeniería genética que emplea enzimas como tijeras moleculares. Las enzimas, llamadas nucleasas, cortan la doble hélice de ADN en sitios específicos; al reparar la rotura, la célula incorpora el material genético que el investigador ha introducido en el núcleo. Cuando Doudna y Charpentier comenzaron a colaborar, el método más avanzado para inactivar o alterar un gen consistía en sintetizar una enzima para que pudiera encontrar y cortar una secuencia de ADN deseada. Es decir, para cada modificación genética se necesitaba generar una proteína nueva que tuviera como objeto una secuencia concreta de ADN.

Un día, Doudna y Charpentier se dieron cuenta de que Cas9, una enzima del sistema defensivo de la bacteria *Streptococcus*, utilizaba ARN para guiarse hacia su secuencia de ADN correspondiente. Observaron que el complejo Cas9-ARN se desplazaba a lo largo de la hélice de ADN, aparentemente al azar, hasta encontrar un sitio adecuado. Pero resultó que Cas9 buscaba siempre la misma secuencia corta de ADN. Entonces se unía a ella, separaba las dos hebras y, si tal secuencia encajaba con la guía del ARN, Cas9 hacía un corte en el ADN. Si se lograra controlar este mecanismo no haría falta sintetizar una enzima nueva cada vez que se quisiera modificar el genoma, con lo que la edición genética resultaría más simple, barata y eficiente.

Esta idea surgió después de que los dos equipos pasaran meses estudiando juntos el mecanismo de Cas9. Doudna recuerda así el momento: «Jinek, entonces investigador posdoctoral, había estado haciendo pruebas con Cas9 en el laboratorio en Berkeley». Un día, apareció en la oficina de Doudna para discutir resultados y estuvieron reflexionando sobre un hecho que él había estado debatiendo antes con Chylinski: en las bacterias *Streptococcus* presentes en la naturaleza, Cas9 usaba dos guías de ARN, no una, para dirigirse al punto exacto en la molécula de ADN de un invasor. ¿Y si pudieran emplear solo una guía de ARN sin que ello afectara a la eficiencia del proceso? Con una sola secuencia de ARN, el proceso de modificación se aceleraría enormemente y sería mucho más fácil de construir que los agentes de unión de las enzimas, con sus elaborados esquemas de codificación, que se empleaban entonces.

«Fue uno de esos momentos en que uno ve unos datos y de repente cae en la cuenta», comenta Doudna. «Se nos ocurrió que podríamos diseñar una guía única de ARN. Con una sola proteína y una sola guía dispondríamos de una herramienta de gran alcance. Al imaginarlo, sentí un escalofrío en la espina dorsal y me dirigí enseguida al laboratorio para comprobarlo. Si esto funciona..., pensé.»



Margaret Knox es periodista y escritora.

Efectivamente funcionó, y con unas consecuencias que Doudna, por muy entusiasmada que estuviera con la idea, nunca había podido imaginar. Cuando ella y Charpentier publicaron los resultados de su investigación sobre el sistema CRISPR-Cas9 el 17 de agosto de 2012, los especialistas en el campo reconocieron de inmediato su enorme potencial. Y desde ese momento se inició una carrera a escala mundial para comprobar sus aplicaciones.

UNA COMERCIALIZACIÓN APRESURADA

En 2013 ya se había conseguido que el sistema CRISPR-Cas9 operara en células vegetales y animales, que son mucho más complejas que las bacterias, y se especulaba sobre usos tan fantasiosos como traer de vuelta a los neandertales y a los mamuts. En Harvard, el equipo dirigido por el genetista George Church empleó CRISPR para alterar genes en células humanas, abriendo un mundo nuevo de posibilidades terapéuticas.

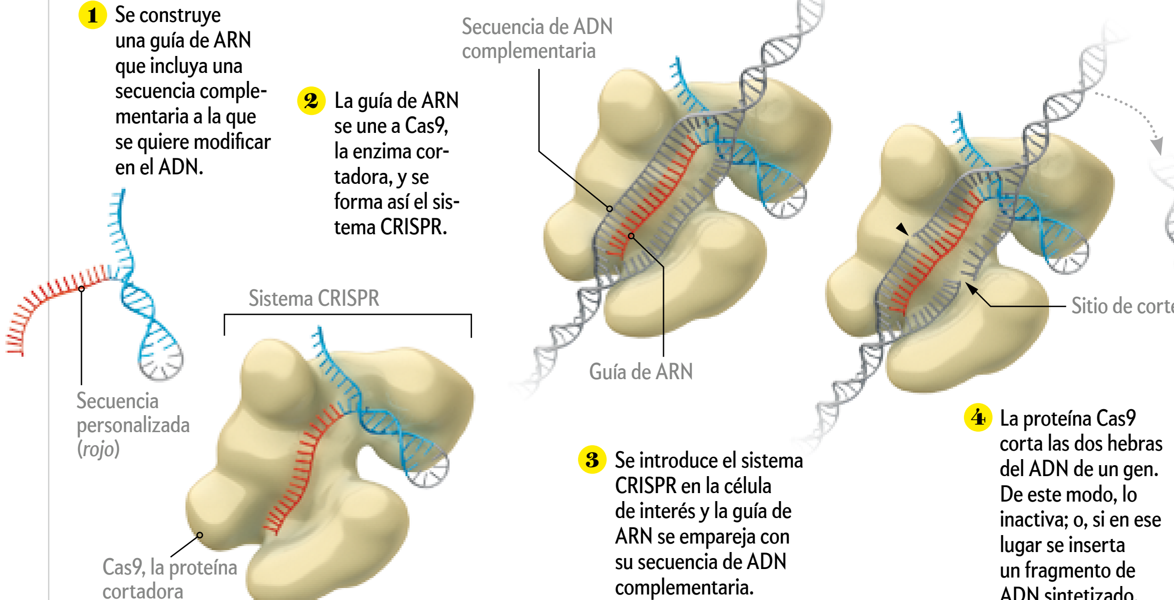
Como suele suceder en estos casos, no se tardó en invertir dinero en la técnica. Hace poco más de un año, Doudna se asoció con Church, Feng Zhang, del MIT, y otros investigadores para lanzar la empresa Editas Medicine, con 43 millones de dólares de capital y el objetivo de desarrollar una nueva clase de medicamentos basados en CRISPR. (La compañía todavía no ha mencionado qué enfermedades pretende tratar primero.) En abril del año pasado se creó CRISPR Therapeutics en Basilea y Londres, con una inversión de 25 millones de dólares y una meta similar. A pesar de la expectación, las posibles terapias de estas empresas están todavía lejos de llegar al mercado. Lo que sí ha logrado una rápida comercialización a escala mundial son los preparados específicos para inyectar CRISPR, así como los ratones, ratas y conejos modificados mediante esta técnica según los requisitos de los clientes.

Un día brumoso del pasado verano visité SAGE Labs en San Luis, la primera empresa autorizada para comercializar CRISPR de Doudna y modificar roedores genéticamente. Allí pude comprobar de primera mano cómo funciona la técnica. SAGE sirve a cerca de veinte de las compañías farmacéuticas más grandes, además de a numerosas universidades, compañías biotecnológicas y fundaciones. (Horizon Discovery Group, una empresa biotecnológica con sede en Cambridge que ya producía CRISPR con éxito, compró SAGE por 48 millones de dólares en septiembre.) SAGE se halla en un grupo de edificios bajos de oficinas en un complejo industrial. Allí reciben un pedido por Internet de un laboratorio de Sacramento, en California, que necesita 20 ratas con el gen *Pink1* inactivado para investigar sobre la enfermedad de Parkinson. Estas ratas y otros roedores modificados mediante CRISPR se hacen crecer en la nueva ala del edificio, que costó 2 millones de dólares,

FUNDAMENTO

Cómo funciona CRISPR

Las bacterias utilizan una estrategia llamada CRISPR para «trocear» los virus invasores. Los científicos pueden ahora apropiarse de este proceso para modificar las secuencias de ADN a su antojo. Al contrario de lo que sucedía con métodos previos de modificación genética, el sistema de CRISPR emplea una sola enzima de uso múltiple llamada Cas9 para hacer los cortes. Lo único que se necesita es crear una guía de ARN para dirigirlo hasta el lugar de interés, algo mucho más sencillo que sintetizar una enzima cada vez.



en jaulas impolutas con control de temperatura que se apilan cuidadosamente desde el suelo hasta el techo. Responder al pedido es tan sencillo como seleccionar 20 de las ratas deseadas, embalarlas en cajas y mandarlas por avión a California. Lo mismo sucede con el resto de los animales modificados para el estudio de otras dolencias o tratamientos, desde la esquizofrenia hasta el control del dolor.

Sin embargo, cuando un cliente necesita ratas o ratones que no se hallan disponibles en SAGE, el proceso es diferente. Si el investigador quiere estudiar la relación entre el párkinson y un gen sospechoso (o incluso una mutación específica dentro de ese gen) existen varias opciones: puede emplearse CRISPR para inactivar el gen en cuestión, introducir una mutación o reemplazar el gen por otro humano. Muchas enfermedades, como el párkinson, la fibrosis quística o el sida, se asocian a numerosas variantes genéticas. En el pasado se requería hasta un año para crear mutaciones complejas y secuenciales en los animales para estudiar esas afecciones. Pero, a diferencia de las anteriores técnicas de edición genética, CRISPR permite realizar múltiples cambios genéticos en una célula de modo rápido y simultáneo, con lo que el tiempo necesario para modificar un animal se reduce a unas cuantas semanas.

Los empleados de SAGE comienzan este proceso generando el ADN personalizado y el ARN que se empareje con este ADN mediante el uso de un kit químico. En una placa de Petri mezclan el ARN y la proteína Cas9, que forman una sustancia con la capacidad de modificar el ADN: la herramienta CRISPR. Luego dedican alrededor de una semana a ensayarla en células animales; emplean un aparato semejante a un escáner de escritorio para aplicar una corriente eléctrica a las células, la cual facilita la entrada de CRISPR en ellas. Una vez en su interior, CRISPR corta el ADN y causa pequeñas inserciones o deleciones. De hecho, como esta técnica no opera a la perfección, algunas células se libran de los cortes o mutaciones. Para comprobar la eficacia de CRISPR, los científicos aíslan el ADN de las células, lo juntan y hacen copias de la región alrededor del sitio de la mutación que pretendían inducir. Después de procesar las muestras, observan los resultados en la pantalla de un ordenador. Si el ADN está mutado, aparece como una banda tenue, la cual se va haciendo más intensa cuanto mejor ha funcionado la técnica.

El siguiente paso se lleva a cabo en el animalario, donde se utiliza CRISPR para modificar embriones en masa y crear ratones mutantes. En uno de esos laboratorios, observo el trabajo del biólogo Andrew Brown. Envuelto en guantes quirúrgicos y ropa azul de papel —calzas, bata y gorro—, se reclina sobre un microscopio de disección, al tiempo que aspira en el extremo de una pipeta de cristal para agarrar un embrión de rata. Con este en la pipeta, atraviesa el cuarto hasta un microscopio más grande, flanqueado por brazos robóticos, lo deposita en una gota del líquido encima de un portaobjetos y se sienta en un taburete. Entonces estira su brazo derecho y, mediante una palanca de control, acerca una aguja de cristal hueco hacia el embrión.

Vistos a través del ocular del microscopio, los dos pronúcleos del embrión, uno de cada progenitor, se asemejan a pequeños cráteres lunares. Entonces Brown presiona sobre la célula hasta que el extremo de la aguja se sitúa cerca de uno de los pronúcleos; pulsa en el ratón del ordenador, y la aguja expulsa una gota minúscula del líquido que contiene CRISPR, el cual atraviesa la membrana plasmática celular. El pronúcleo se hincha como

AXS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO

una flor que se abre a cámara rápida. Con suerte, Brown habrá creado una célula mutante. Los tres técnicos de SAGE repiten esta tarea hasta 300 veces por día, cuatro días a la semana.

A continuación, Brown aspira el embrión modificado dentro de una pipeta, lo deposita en una placa de Petri y lo introduce en una incubadora climatizada a la temperatura corporal de los humanos. Al final inyectará el embrión, junto con otros treinta o cuarenta, en una rata que hará las veces de madre portadora. A los veinte días esta dará a luz a veinte crías y, transcurridos diez días más, los investigadores extraerán de ellas muestras de tejidos para ver cuáles han incorporado el gen modificado.

«Esa es la parte emocionante», comenta Brown. «Puede que solo una de veinte crías presente el cambio. La denominamos animal fundador. Cuando obtenemos al menos uno, lo celebramos por todo lo alto.» Al observar a los científicos de SAGE preparando ARN o inyectado embriones, todo parece fácil. Y de hecho, esos mismos procesos están sirviendo para modificar animales en numerosos laboratorios de todo el mundo.

El pasado junio, investigadores del MIT lograron curar la tirosinemia (una enfermedad hepática rara causada por la mutación de una enzima) en ratones adultos mediante una simple inyección de CRISPR en la cola

PROMESAS Y OBSTÁCULOS

A medida que la comercialización de CRISPR va avanzando, investigadores y empresarios siguen imaginando nuevos usos de esta técnica. Algunos de ellos podrían parecer algo osados. Se especula, por ejemplo, con poder corregir la alteración cromosómica asociada al síndrome de Down durante las fases tempranas del embarazo; reintroducir la vulnerabilidad a los herbicidas en las malas hierbas resistentes; o traer de vuelta especies animales extintas. No es sorprendente que se sienta cierto miedo ante tales aplicaciones. Los comentaristas más agoreros han advertido que, en nuestro intento por eliminar a los mosquitos portadores de malaria, curar la enfermedad de Huntington o diseñar mejores bebés, podríamos acabar creando un parque jurásico lleno de genes peligrosos.

Consideremos la idea de emplear CRISPR para hacer frente a la malaria. «Una cosa es eliminar el parásito y otra totalmente distinta es aniquilar el mosquito que los transmite», comenta Todd Kuiken, analista de bioseguridad en el Centro Internacional para Académicos Woodrow Wilson en Washington. «Si el objetivo es erradicar la enfermedad, que infecta a 200 millones de personas al año y mata a 600.000, deberíamos tener cuidado de no causar aún mayores problemas. Si después de pensarlo estamos dispuestos a dar el paso, deberíamos preguntarnos también con qué sistemas de seguridad contamos.»

Pero la comunidad científica ya está previendo los peligros más probables de la técnica CRISPR y está diseñando planes de acción ante ellos. El pasado julio, cuando un equipo de Harvard publicó un artículo sobre la eliminación de un mosquito mediante CRISPR, se hizo también un llamamiento para iniciar un debate público. De esta manera, comenzaron a lanzarse propuestas, tanto legislativas como técnicas, para solucionar los problemas asociados a la modificación genética mediante CRISPR. «La técnica está instaurándose con increíble rapidez», observa Jeantine Lunshof, experta en bioética del equipo de Harvard. «Muchas personas no han oído ni siquiera hablar de ella y ya la están usando. Es una dinámica totalmente nueva.» Como parte de la Iniciativa Innovadora de Genómica en Berkeley, Doudna ha creado expresamente un grupo para discutir las implicaciones éticas de la aplicación de CRISPR.

Pero las cuestiones éticas difícilmente sofocarán el entusiasmo que se ha generado alrededor de esta invención. El pasado junio, investigadores del MIT lograron curar la tirosinemia (una enfermedad hepática rara causada por la mutación de una enzima) en ratones adultos mediante una simple inyección de CRISPR en la cola. Al introducir tres guías de ARN, la enzima Cas9 y la secuencia correcta de ADN para el gen mutado, consiguieron insertar el gen normal en aproximadamente una de cada 250 células hepáticas de ratones. Durante el mes siguiente, las células sanas prosperaron y sustituyeron a un tercio de las dañadas, una acción que logró terminar con la enfermedad. Y en agosto, el virólogo Kamel Khalili, de la Universidad Temple, y su equipo informaron de que habían usado CRISPR para trocear el virus del VIH, causante del sida, y lo habían eliminado de varios tipos de células humanas.

Khalili, que lleva trabajando contra el sida desde los días más difíciles en los años ochenta, considera CRISPR una técnica revolucionaria, ya que, a pesar de los enormes avances en el tratamiento de esta enfermedad, los medicamentos de hoy en día solo pueden controlar al virus, pero no suprimirlo. Ahora, mediante CRISPR, el equipo de Khalili ha hecho desaparecer por completo la copia integrada del VIH, convirtiendo las células infectadas en sanas. Khalili comenta que, además de eliminar el virus, CRISPR puede también inmunizar células no infectadas, al incorporar en ellas una secuencia del virus, de una manera similar al mecanismo descubierto por Doudna y su equipo en bacterias primitivas. Podríamos llamarla vacuna genética. «Si me hubieran preguntado hace dos años sobre la posibilidad de eliminar el VIH de una célula humana, habría respondido que estábamos todavía lejos de ello. Pero ya lo hemos conseguido», comenta Khalili. «Puede ser la curación definitiva.»

PARA SABER MÁS

RNA-programmed genome editing in human cells. Martin Jinek et al. en *eLife*, art. 00471, enero de 2013.
Cas9 as a versatile tool for engineering biology. Prashant Mali et al. en *Nature Methods*, vol. 10, págs. 957-963, octubre de 2013.
Cas9 targeting and the CRISPR revolution. Rodolphe Barrangou en *Science*, vol. 344, págs. 707-708, mayo de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

La revolución del ARN. Christine Gorman y Dina Fine Maron en *IyC*, junio de 2014.



INNOVACIÓN

OTRAS NUEVE GRANDES IDEAS





CÉLULAS REPROGRAMABLES

Controlar las células mediante presión

Si de algún modo lográramos que nuestras células hicieran lo que se nos antojara, podrían producir insulina, atacar tumores y realizar otras tareas útiles. Sin embargo, tomar el control de una célula no resulta fácil. Los métodos actuales consisten en introducir virus en ellas, lo cual tiende a causar daños permanentes.

En 2009, un equipo del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) resolvió de manera casual este problema. Los investigadores estaban enfrascados en un experimento para implantar nanomateriales y macromoléculas en células mediante una pistola de agua microscópica. En concreto, trataban de introducir en ellas sustancias que pudieran alterar su comportamiento sin destruirlas. El ingeniero químico Armon Sharei se dio cuenta de que, en algunos casos, las células a las que se les disparaba agua se deformaban durante unos instantes y, mientras se encontraban en ese estado, los materiales penetraban en ellas. «Resulta que, si se altera la forma de una célula con la suficiente rapidez, se consigue franquear temporalmente su membrana», explica Sharei. No obstante, la pistola de agua representaba una herramienta demasiado rudimentaria. Necesitaban un método más delicado para «comprimir» las células.

Sharei, bajo la supervisión de Klavs F. Jensen, uno de los padres la microfluídica, y del pionero de la biotecnología Robert S. Langer, desarrolló un microchip de silicio y cristal que lleva grabados una serie de canales a través de los cuales circulan las células. Los canales se estrechan gradualmente hasta alcanzar un diámetro inferior al de estas. Las células, flexibles, consiguen avanzar gracias a la presión que se ejerce sobre ellas. En el proceso, se forman en la membrana poros transitorios que, aunque minúsculos, son lo bastante amplios como para dejar entrar una variedad de sustancias modificadoras del comportamiento, entre ellas proteínas, ácidos nucleicos y nanotubos. Esta técnica funciona incluso con células madre e inmunitarias, demasiado sensibles para ser manipuladas con los métodos habituales. «Nos quedamos asombrados por la cantidad de células a las que podíamos aplicar este procedimiento», cuenta Sharei.

Desde el descubrimiento inicial, el grupo ha desarrollado 16 chips con canales diseñados para comprimir distintos tipos de células. Pronto habrá más chips, y el dispositivo, que ya puede procesar 500.000 células por segundo, continúa mejorando en velocidad y eficiencia. El grupo ha fundado una compañía llamada SQZ Biotech para comercializar la técnica y, dentro de poco, sus productos serán usados por científicos de Francia, Alemania, Países Bajos y Reino Unido.

—Ryan Bradley



ORGANISMOS TRANSPARENTES

Un método inspirado en la exposición *Mundos corporales* promete acelerar las investigaciones biomédicas

Hace cinco años, Viviana Gradinaru se dedicaba a obtener finos cortes de cerebro de ratón en un laboratorio de neurobiología, recopilando con lentitud imágenes de las rodajas bidimensionales para componer una representación tridimensional por ordenador. En su tiempo libre iba a ver la exposición *Mundos corporales* (*Korperwelten*, en su título original alemán). Le fascinaban en especial los restos «plastinados» que se exhibían del sistema circulatorio humano. Se le ocurrió que mucho de su trabajo podría perfeccionarse si empleaba un proceso similar.

El «aclarado de tejidos» existe desde hace más de un siglo, pero los métodos disponibles se basan en empapar las muestras de tejidos en disolventes, una técnica lenta que suele destruir las proteínas fluorescentes necesarias para marcar ciertas células de interés. Con el fin de desarrollar un procedimiento mejor, Gradinaru, a la sazón estudiante de posgrado, y sus colegas del laboratorio dirigido por el neurocientífico Karl Deisseroth se centraron en reemplazar las moléculas lipídicas del tejido, que lo vuelven opaco. Sin embargo, para evitar el colapso, se requería que el sustitutivo ejerciera también una función estructural, como hacen los lípidos.

El primer paso consistía en sacrificar un roedor y bombear formaldehído en su cuerpo a través del corazón. A continuación le quitaban la piel y llenaban los vasos sanguíneos con monómeros de acrilamida, un compuesto cristalino blanco e inodoro. Los monómeros creaban una malla de hidrogel que actuaba como soporte, sustituía a los lípidos y aclaraba el tejido. Pronto lograron convertir en transparente el cuerpo de un ratón, un proceso que duraba dos semanas.

Al cabo de poco empezaron a utilizar roedores transparentes para trazar el mapa completo de su sistema nervioso. La transparencia les dio la posibilidad de identificar nervios periféricos (haces minúsculos de fibras nerviosas que aún no se comprenden muy bien) y de representar la propagación de los virus a través de la barrera hematoencefálica de los roedores; lo consiguieron al marcar los virus con un agente fluorescente, inyectar estos en la cola del animal y observar cómo se extendían por el cerebro. «Es como ver el mundo en su conjunto en lugar de verlo en capas separadas», comenta Gradinaru. El proceso reduce el riesgo de error humano, agiliza el trabajo de laboratorio, genera datos más reveladores y exige emplear menos animales. Gradinaru ofrece la receta de su preparado de hidrogel a cualquier laboratorio que la solicite. Su siguiente paso consistirá en utilizar esta técnica para hallar, cartografiar y estudiar células madre y cancerosas.

—Ryan Bradley

PILAS DE COMBUSTIBLE ALIMENTADAS CON SALIVA

Una posible nueva fuente de energía para dispositivos médicos

Muhammad Mustafa Hussain, profesor de ingeniería eléctrica en la Universidad Rey Abdalá de Ciencia y Tecnología, en Arabia Saudí, dedica casi todo su tiempo a construir aparatos sumamente diminutos. «Cuando se trabaja a pequeña escala se obtienen resultados rápidos», afirma. Así procedió en 2010, cuando se propuso desarrollar una fuente de energía renovable y abundante que pudiera usarse en lugares remotos para hacer funcionar máquinas destinadas a depurar el agua o diagnosticar enfermedades. Pensó que una minúscula pila de combustible microbiana serviría como punto de partida. Pero lo realmente innovador fue que eligiera alimentar dicha pila con saliva.

La idea fue planteada por la colaboradora de Hussain, Justine E. Mink, por entonces estudiante de doctorado en su laboratorio. En aquella época, Mink intentaba construir dispositivos para medir la glucosa en los diabéticos que incorporaran una fuente de energía y tuvieran un tamaño adecuado para poder implantarlos en el cuerpo, cerca del páncreas. Una pila de combustible microbiana constituía un candidato natural para tal propósito. En ella, las bacterias generan electricidad a partir de la materia orgánica, abundante en la saliva. De este modo, los dos investigadores tomaron un electrodo de grafeno (un material altamente conductor), cargaron la celda con bacterias capaces de alimentarse de saliva y, en cuestión de semanas, habían logrado generar casi un microvatio, la millonésima parte de un vatio de potencia.

Si bien representa una cantidad de energía ínfima, resulta suficiente para los «laboratorios en chips», las herramientas de diagnóstico y de monitorización tales como el dispositivo de Mink. Hussain colabora con compañías que imprimen órganos artificiales en 3D para integrar su pila en un riñón artificial, donde los fluidos corporales proporcionarían el combustible. Señala que se trata tan solo del primer paso en la aplicación de la técnica a mayor escala. Su meta a largo plazo es generar electricidad a partir de residuos orgánicos industriales para suministrar energía a plantas desalinizadoras en los países pobres.

—Ryan Bradley

PANTALLAS CORRECTORAS DE LA VISIÓN

Teléfonos y tabletas con paneles autocorrectores que se adaptan a la vista permitirán prescindir de las gafas

En Estados Unidos, más del 40 por ciento de las personas de 40 años necesitan gafas para leer, una cifra que asciende hasta casi el 70 por ciento en ancianos mayores de 80 años. «A medida que envejecemos, los defectos de refracción oculares, o ametropías, desempeñan un papel más importante en nuestra vida», explica Gordon Wetzstein, profesor adjunto de ingeniería eléctrica en la Universidad Stanford.

Sin embargo, las gafas y las lentillas no siempre constituyen el remedio ideal. Si se sufre presbicia, por ejemplo, no se necesitan gafas para ver las señales de tráfico durante la conducción, pero sí hacen falta para leer el velocímetro o el GPS. Wetzstein señala que la mejor solución en tales casos consiste en utilizar pantallas correctoras de visión; en otras palabras, pantallas que «incorporen» las gafas que uno necesita.

Él y sus colaboradores del MIT (donde trabajaba anteriormente) y de la Universidad de California en Berkeley las han desarrollado. La acción correctora se consigue introduciendo dos modificaciones en una pantalla estándar de alta resolución de una tableta o un teléfono inteligente. La primera de ellas consiste en una lámina transparente impresa, de bajo coste y llena de minúsculos orificios, que cubre la pantalla. La segunda, en algoritmos codificados en el teléfono o la tableta que determinan la posición del observador con respecto al dispositivo y distorsionan la imagen proyectada según la graduación del usuario. Cuando la imagen distorsionada atraviesa la matriz de orificios de la cubierta transparente, la combinación de *hardware* y *software* genera errores en la pantalla que compensan los defectos oculares, lo que da lugar a lo que parece una imagen nítida. La pantalla puede realizar ajustes para corregir la miopía, la hipermetropía, el astigmatismo y otros problemas de la vista más complejos. El equipo presentó el trabajo en la conferencia SIGGRAPH celebrada el pasado agosto en Vancouver.

Las pruebas provisionales efectuadas con un pequeño grupo de usuarios han mostrado que la técnica funciona, asegura Wetzstein, pero hacen falta estudios a gran escala para perfeccionarla. En el proceso, los investigadores también planean desarrollar un control táctil que permita enfocar manualmente la pantalla. Wetzstein opina que tal avance supondría una bendición para la gente de países en desarrollo, que tiene un acceso más fácil a los dispositivos móviles que a un par de lentes graduadas. *—Rachel Nuwer*

LEGO A ESCALA ATÓMICA

El ensamblaje de láminas de materiales de un átomo de espesor da lugar a sustancias con propiedades completamente nuevas y posibilidades asombrosas

Andre K. Geim





Las piezas de Lego, esos pequeños bloques para ensamblar, han inspirado a varias generaciones. Estos ladrillos de plástico se han convertido en coches fantásticos, en espectaculares castillos y en muchas otras creaciones que son más que la suma de sus partes. En la actualidad, en cambio, una generación de científicos de materiales se inspira en un nuevo tipo de lego basado en bloques de construcción a escala atómica.

Esos nuevos elementos consisten en láminas de materiales que pueden ser tan finas como un átomo y que pueden apilarse, una encima de otra, según una secuencia bien definida. Este fino control de la construcción no tiene precedentes y permite obtener sustancias con propiedades ópticas y eléctricas que antes resultaban imposibles de crear. Con ellas, los científicos imaginan dispositivos fabricados con materiales conductores de la electricidad que ofrezcan muy poca resistencia, ordenadores más rápidos y potentes, y aparatos electrónicos ponibles que podrían ser flexibles, plegables e increíblemente ligeros.

Ese gran avance surgió a raíz de la creación del grafeno, un material formado por una única lámina de átomos de carbono que, junto con mis colegas de la Universidad de Manchester, aislamos de un bloque de grafito volumétrico en el año 2004 [*véase* «Grafeno», por André K. Geim y Philip Kim; Investigación y Ciencia, junio de 2008]. Construimos esa lámina con cristales de seis lados que se repetían (la estructura atómica guarda semejanza con una alambrada de malla), arrancando con cinta adhesiva capas de solo un átomo de grosor de la parte superior del bloque. En el último decenio, diversos investigadores han encontrado otras varias docenas de cristales volumétricos que pueden desarmarse de la misma forma, y su número continúa creciendo. La mica constituye un ejemplo, al igual que otros materiales con nombres tan exóticos como nitruro de boro hexagonal y disulfuro de molibdeno.

Esas capas cristalinas se consideran bidimensionales porque su espesor más pequeño posible es un único átomo. (También pueden usarse cristales más gruesos, de tres o cuatro átomos.) Sus otras dimensiones (anchura y longitud) pueden ser mucho más grandes, según los deseos del fabricante. En el último par de años, los cristales bidimensionales se han convertido en un tema candente en el campo de la ciencia de materiales y la física del estado sólido porque exhiben multitud de propiedades únicas. [El grafeno centra uno de los principales macroproyectos de investigación financiados por la Comisión Europea http://graphene-flagship.eu.]

Podemos apilar estas capas en formas que resultan muy estables. No se unen entre sí de un modo habitual (mediante enlaces covalentes que comparten electrones, por ejemplo), sino que, cuando se hallan próximos, los átomos se atraen unos a otros gracias a las débiles fuerzas de Van der Waals. Por lo general, esta interacción no sería suficiente para que los átomos y las moléculas se mantuvieran unidos, pero, debido a que estas láminas bidimensionales tienen una densidad de átomos tan elevada y se hallan tan cerca unas de otras, la fuerza acumulativa llega a ser formidable.

Para comprender las tentadoras posibilidades que ofrece esta clase de ingeniería de materiales, pensemos en la superconductividad a temperatura ambiente. La idea de transportar electricidad sin pérdida de energía y de hacerlo sin la necesidad de mantener aislados los aparatos en un frío casi inimaginable ha constituido la meta de los científicos durante generaciones. Si se encontraran materiales capaces de hacerlo, las consecuencias para nuestra civilización serían trascendentales. Existe el consenso de que el objetivo es teóricamente alcanzable, pero nadie sabe cómo. En la actualidad, la temperatura más alta a la que los materiales se comportan como superconductores no supera los −100 grados Celsius. En las últimas dos décadas se han efectuado muy pocos avances para elevar este límite.

En fecha reciente hemos descubierto que algunos superconductores formados por óxidos (compuestos con al menos un átomo de oxígeno, junto con algún otro elemento) pueden desarmarse en capas individuales de la manera que he descrito. ¿Y si volviéramos a ensamblarlos en otra secuencia e insertáramos planos cristalinos adicionales? Ya sabemos que la superconductividad en óxidos depende de la separación entre capas y que añadir láminas monoatómicas entre los planos cristalinos puede convertir algunos materiales que conducen mal la electricidad, o que son incluso aislantes, en superconductores.

La idea aún no ha terminado de ponerse a prueba, sobre todo porque la técnica para crear piezas de lego a escala atómica se encuentra todavía en pañales. De hecho, el ensamblaje de estructuras multicapa complejas entraña dificultades: en raras ocasiones constan de más de cinco capas y suelen emplearse solo dos o tres bloques de construcción (casi siempre grafeno en combinación con cristales bidimensionales de nitruro de boro aislante y materiales semiconductores como el disulfuro de molibdeno y el diseleniuro de tungsteno). Dado que los apilamientos se componen de diversos materiales, a menudo se refieren a ellos como heteroestructuras. En la actualidad son pequeñas; su tamaño típico ronda tan solo las 10 micras de ancho y de largo, que es menor que el diámetro de la sección transversal de un cabello humano.

Mediante esos apilamientos, podemos llevar a cabo experimentos en busca de aplicaciones novedosas y nuevas propiedades ópticas o eléctricas. Un aspecto intrigante: pese a ser tan finas, estas láminas son también bastante flexibles y transparentes. Tal característica ofrece oportunidades para desarrollar aparatos emisores de luz que puedan moldearse en varias formas, como pantallas que puedan plegarse y desplegarse cuando el usuario necesite un tamaño mayor. También podrían aplicarse a la obtención de chips informáticos que usaran energía de un modo mucho más eficiente.

Si los investigadores hallan algo importante en sus estudios sobre estas estructuras, creemos que será posible escalar la técnica para uso industrial. Ya ha sucedido con el grafeno y algunos otros cristales bidimensionales. Inicialmente nacieron como minúsculas cristalitas de una pocas micras de ancho, pero ahora se fabrican láminas de varios cientos de metros cuadrados.

Si bien por ahora no se ha informado de ninguna «aplicación asesina», los avances en este campo están causando una fuerte agitación en la comunidad científica. El progreso humano siempre ha seguido de cerca al descubrimiento de nuevos materiales. Pensemos en las transiciones de la Edad de Piedra a la de Bronce, a la de Hierro y a la del Silicio. La versión nanométrica del Lego representa algo que nunca antes se ha creado. Ahora mismo, su potencial parece infinito.



Andre K. Geim es físico en la Universidad de Manchester. Compartió el premio Nobel de física en 2010 por su trabajo sobre el grafeno.

PLÁSTICOS ULTRADUROS RECICLABLES

Polímeros ecológicos lo bastante resistentes para ser usados en coches y aviones

Cuando la química Jeannette García descubrió en un matraz una masa blanca del tamaño de un caramelo, no tenía la menor idea de lo que acababa de crear. La sustancia se encontraba pegada firmemente al cristal, por lo que utilizó un martillo para extraerla. Sin embargo, cuando la golpeó se negó a romperse. «Al ver lo fuerte que era, supe que necesitaba averiguar cómo la había obtenido», explica.

García, científica del laboratorio IBM Research de Almaden, California, pidió asesoramiento a varios colegas para resolver el rompecabezas. Estos concluyeron que había tropezado con una nueva familia de polímeros termoestables, unos plásticos extraordinariamente resistentes empleados en productos que abarcan desde teléfonos móviles hasta alas de avión. Los plásticos termoestables representan una tercera parte de la producción mundial anual de polímeros, pero resultan difíciles de reciclar. El material recién descubierto, bautizado Titán, es el primer plástico termoestable reciclable y apto para uso industrial.

A diferencia de los compuestos termoestables clásicos, que se resisten a ser remoldeados, este polímero puede volver a procesarse mediante una reacción química. García y sus colaboradores anunciaron su hallazgo en mayo del año pasado en la revista *Science*.

Se espera que pronto aumente la demanda mundial de plásticos duraderos y reciclables. Así, Europa y Japón obligarán a que en 2015 el 95 por ciento de los recambios automovilísticos fabricados sean reciclables. El material de García resultaría perfecto en tales casos. Además, el nuevo polímero podría, con el tiempo, extenderse a una amplia variedad de aplicaciones: revestimientos anticorrosivos y antibacterianos, administración de fármacos, adhesivos, impresión en 3D y depuración de aguas, entre otras.

Pero este descubrimiento no vino solo. García y sus colaboradores hallaron una segunda forma del material, una sustancia gelatinosa y autorreparable, a la que llamaron Hydro, que se produce a temperaturas más bajas. «Si se corta por la mitad y luego se vuelve a unir, forma enlaces en el acto», comenta García. Podría emplearse como adhesivo o pintura autorreparable. Es posible que aparezcan otros compuestos relacionados. «No se trata tan solo de un nuevo polímero, sino de una nueva reacción de polimerización», explica. —*Rachel Nuwer*



RECARGA INALÁMBRICA CON ONDAS SONORAS

Un modo de obtener electricidad a través del aire

En 2011, Meredith Perry, por entonces estudiante de paleobiología en la Universidad de Pensilvania, mientras utilizaba el engorroso cargador de su portátil se preguntó si este quedaría algún día obsoleto. Empezó entonces a investigar métodos para convertir esa idea en realidad. Y averiguó que ya existían los transmisores de energía inalámbricos basados en inducción y resonancia magnética, aunque tenían un alcance restringido. Su limitación se debía a la ley del inverso del cuadrado, que establece cómo decrece la intensidad de la radiación electromagnética con la distancia a la fuente emisora.

Sin embargo, las vibraciones mecánicas no se verían afectadas por este problema. Aprovechar las del aire mediante transductores piezoeléctricos que convirtieran esa energía mecánica en electricidad parecía una buena idea. Como el sonido no es nada más que la vibración de las partículas del aire, en teoría debería poder transmitir energía. Y los ultrasonidos, que son seguros, silenciosos y poseen una alta carga energética, servirían a la perfección.

Cuando Perry comentó esta idea con profesores de su universidad y otros, muchos le aseguraron que no funcionaría: resultaría imposible extraer suficiente potencia de los ultrasonidos para cargar dispositivos electrónicos, y tendría que lidiar con un montón de problemas de acústica y de ingeniería eléctrica si lo intentaba. Pero nadie le aportó pruebas suficientes que demostraran la inviabilidad de la técnica. Así pues, fundó una compañía, uBeam, para desarrollarla. El transmisor uBeam, ahora en fase de prototipo, actúa como un altavoz direccional. Concentra los ultrasonidos para crear un «punto caliente» de energía, y un receptor acoplado a un dispositivo electrónico la recoge y la convierte en electricidad. Se propone despachar el primer lote de productos dentro de dos años.

Perry opina que un sistema de carga inalámbrica universal eliminaría la multitud de cables y cargadores incompatibles que pululan hoy y permitiría a los dispositivos móviles ejecutar tareas que consumen mucha energía sin agotar la batería. Deshacerse de los cables también crearía nuevas opciones para el diseño de interiores y reduciría el peso en aviones, coches, naves espaciales y cualquier vehículo cargado con pesados cables de alimentación. «Supondría una liberación por lo que respecta a nuestra interacción con el mundo físico», comenta Perry. «Nos desencadenaría de la pared.» —*Rachel Nuwer*



BATERÍAS QUE APROVECHAN EL CALOR RESIDUAL

Una tercera parte de toda la energía que se pierde en Estados Unidos podría producir electricidad

Las paredes de algunas industrias podrían revestirse de paneles de baterías para convertir el calor residual en electricidad

Cada año la energía que se disipa en forma de calor residual en los procesos industriales bastaría para iluminar 10 millones de hogares. El efecto termoeléctrico por el que se genera una corriente eléctrica debido a una diferencia de temperatura brinda un medio para transformar ese calor en electricidad, pero solo en parte. Durante décadas ha hecho falta una diferencia de temperatura de 500 grados centígrados o más para obtener una cantidad útil de energía, explica Yuan Yang, investigador posdoctoral en el MIT. Es una lástima, pues la Agencia de Protección Ambiental estima que una tercera parte de toda la energía desperdiciada cada año en Estados Unidos se pierde a temperaturas inferiores a los 100 grados centígrados.

Yang, su profesor Gang Chen, el investigador posdoctoral Seok Woo Kee y Yi Cui, de Stanford, han desarrollado un método para captar calor a partir de diferencias de temperatura de tan solo 50 grados centígrados. El truco reside en explotar el efecto termogalvánico, relacionado con el efecto termoeléctrico, que establece que el voltaje depende de la temperatura del material. El grupo tomó baterías sin carga con electrodos de cobre, las recargó mientras estaban calientes y a continuación las enfrió. Lograron así que suministraran un voltaje superior al que se había necesitado para cargarlas. En otras palabras, la energía usada para calentar la batería se recuperó en forma de electricidad.

Yang señala que únicamente en los dos últimos años los electrodos de las baterías han alcanzado la eficiencia suficiente para convertir diferencias tan bajas de temperaturas en electricidad, y aún queda mucho por desarrollar antes de que el proceso pueda comercializarse. Pero, con el tiempo, las paredes de las chimeneas industriales o de las centrales eléctricas podrían revestirse con paneles de baterías para convertir el exceso de calor de baja intensidad en electricidad. «Resulta atractivo», comenta Yang, «porque esta forma de calor se halla por doquier». *—Rachel Nuwer*

VIDEOCÁMARAS QUE DETECTAN NANOPARTÍCULAS

La resolución de un microscopio electrónico para aplicaciones industriales rápidas y baratas

Aunque el uso de microscopios electrónicos que alcanzan una resolución de nanómetros está muy extendido, los aparatos cuestan millones de dólares, y la preparación de muestras para su observación exige un enorme esfuerzo. Aunque son de indudable valor en el laboratorio, resultan poco prácticos en aplicaciones industriales, como en la identificación rápida de agua microscópica en muestras de productos.

La solución podría hallarse en una nueva técnica de microscopía holográfica desarrollada por David Grier, físico de la Universidad de Nueva York, y sus colaboradores. Empezaron con un microscopio Zeiss estándar y sustituyeron la lámpara incandescente por un láser. Al iluminar una muestra del material, la luz se dispersa; se crea entonces un patrón bidimensional de interferencia entre el haz del láser y la luz dispersada —un holograma—, que se graba con una cámara de vídeo.

Los científicos llevan décadas obteniendo hologramas de objetos microscópicos, pero extraer información útil de ellos siempre ha revestido dificultad. Aquí es donde el invento de Grier adquiere más valor. Su equipo ha creado un *software* que resuelve con rapidez las ecuaciones que describen cómo se dispersa la luz al incidir sobre un objeto esférico; al hallar los valores de ciertos términos de dichas ecuaciones, el programa recopila información sobre el objeto que causa la dispersión. La resolución nanométrica del microscopio permitirá examinar las partículas que flotan en soluciones coloidales (por ejemplo, en una muestra de pintura) con un equipo que cuesta diez veces menos que un microscopio electrónico.

Grier alberga la esperanza de que su aparato proporcione el primer método rápido y asequible para vislumbrar partículas individuales en el seno de los productos de hoy. Imaginemos un cubo de pintura o un bote de champú en el que cada gota contenga partículas que llevan codificada la historia de fabricación del producto: cómo se ha hecho, en qué factoría y cuándo, «algo así como una huella dactilar», señala Grier. Añade que el microscopio podría leer con la misma facilidad un mensaje molecular estampado en medicamentos, explosivos u otros artículos. *—Ben Fogelson*

PARA SABER MÁS

A vector-free microfluidic platform for intracellular delivery. Armon Sharei et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 110, n.º 6, págs. 2082-2087, febrero de 2013. **www.pnas.org/content/110/6/2082.full**

Fast feature identification for holographic tracking: The orientation alignment transform. Bhaskar Jyoti Krishnatreya y David G. Grier en *Optics Express*, vol. 22, n.º 11, págs. 12.773-12.778, junio de 2014.

Eyeglasses-free display: Towards correcting visual aberrations with computational light field displays. Fu-Chung Huang et al. en *ACM Transactions on Graphics*, vol. 33, n.º 4, artículo n.º 59, julio de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Ideas que cambian el mundo. VV.AA. en *IyC*, febrero de 2014.

NOCHE ESTRELLADA: La Vía Láctea brilla en el cielo nocturno frente a la costa del desierto de Atacama, en Chile.

ASTRONOMÍA

LOS FÓSI

En el pasado, la Vía Láctea engulló un gran número de galaxias enanas. Los restos de ese banquete cósmico están ayudando a los expertos a entender cómo se formó nuestro particular rincón del universo

Kathryn V. Johnston

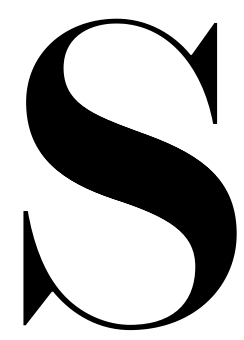


LES

DE LA VÍA LÁCTEA



Kathryn V. Johnston dirige el departamento de astronomía de la Universidad de Columbia. Su investigación se centra en los procesos de formación y crecimiento de las galaxias, con especial interés en los que atañen a la Vía Láctea.



I CONTEMPLAMOS EL FIRMAMENTO EN UNA NOCHE OSCURA Y SIN NUBES, LEJOS DE LAS luces de la ciudad, podremos ver la brillante banda de la Vía Láctea formando un arco espectacular sobre nuestras cabezas. Han pasado cuatro siglos desde que Galileo apuntase por primera vez un telescopio hacia ese paisaje y descubriese que, en realidad, aquella «leche» se componía de un sinfín de estrellas, solo que demasiado tenues para distinguirlas a simple vista. Trescientos años después, los astrónomos se convencieron de que la Vía Láctea no era más que una de entre los miles de millones de galaxias que pueblan el universo.

Pero la Vía Láctea es algo más que «una» galaxia. Varios estudios han demostrado que, a lo largo de la historia cósmica, nuestra galaxia atrajo hacia sí a otras de menor tamaño y absorbió sus estrellas. En el presente, al menos 20 galaxias enanas —con tamaños que van desde una millonésima hasta una centésima parte del de la Vía Láctea— orbitan a su alrededor, y probablemente haya docenas más que aún no hemos descubierto. Se cree que estas galaxias satélite solo representan una diminuta fracción de todas las que existieron en el pasado, las cuales habrían sido arrastradas hacia la Vía Láctea en tiempos remotos. Esa ingesta cósmica, que comenzó cuando nuestra galaxia era mucho más joven y pequeña que ahora, aún continúa. En un futuro, la Vía Láctea podría acabar devorando las galaxias satélite que todavía merodean a su alrededor.

Las víctimas del apetito gravitatorio de la Vía Láctea dejaron un rastro que aún puede verse en forma de sutiles regueros de estrellas. Durante los últimos 15 años, un campo de investigación relativamente nuevo, la «arqueología galáctica», ha permitido descubrir varias de esas corrientes estelares. Gracias al estudio de estos fósiles, los arqueólogos galácticos han comenzado a entender mejor la historia de la Vía Láctea, al tiempo que han obtenido nuevas pistas sobre el nacimiento y la evolución de otras galaxias espirales.

Lo ideal sería poder estudiar una galaxia tanto desde fuera como desde dentro. Semejante objetivo resulta impracticable. Sin embargo, el primer plano que nos brinda la Vía Láctea nos ha permitido acceder a información imposible de adquirir examinando otras galaxias desde el exterior.

Esta área de investigación nos ha ayudado a confirmar uno de los procesos por los que la Vía Láctea y otras galaxias jóvenes aumentaron de tamaño. El hallazgo de múltiples corrientes estelares, procedentes de galaxias satélite desaparecidas hace largo tiempo, apoya una teoría compartida por gran parte de la comunidad astronómica: que la Vía Láctea comenzó como una estructura de poco tamaño que, en parte, creció al ir engullendo grandes bocados de materia. Este proceso recibe el nombre de formación jerárquica de estructuras. Aunque numerosos detalles siguen envueltos en misterio, podemos decir que, poco a poco, hemos comenzado a escribir la biografía de la Vía Láctea.

CÓMO CONSTRUIR UNA GALAXIA

Según la teoría de formación jerárquica de estructuras, el principal motor de crecimiento de las galaxias de gran tamaño no es la materia bariónica (las partículas ordinarias que forman las estrellas, el gas y el polvo que podemos ver), sino los gigantescos halos de materia oscura que las envuelven. Se cree que primero se gestan halos de materia oscura de poco tamaño; después, estos se van aglomerando y, con el tiempo, las estructuras mayores engullen a las más pequeñas.

En el universo actual, el halo de materia oscura de cualquier galaxia es mucho más masivo y extenso que la parte visible. La naturaleza de la materia oscura sigue constituyendo un verdadero misterio: solo se sabe que existe por el efecto gravitatorio que ejerce sobre la materia ordinaria, pero se ignora su composición. Sin embargo, existen razones para pensar que se aglomera de la manera descrita, ya que las observaciones relativas al ritmo con que se agrupan e interaccionan las galaxias cuadran con las predicciones de los modelos que postulan tales acumulaciones de materia oscura. En realidad, las incógnitas que aún persisten sobre el proceso de formación de galaxias no atañen a la materia oscura, sino a la ordinaria.

La idea básica sobre el modo en que la materia bariónica contribuye a la evolución de las galaxias comienza con un halo de materia oscura. Debido a su intensa atracción gravitatoria,

EN SÍNTESIS

A lo largo de la historia cósmica, la intensa gravedad de la Vía Láctea desgarró las galaxias enanas que orbitaban a su alrededor. En el proceso se formaron largas corrientes de estrellas: «fósiles» cuyo estudio permite reconstruir la historia de nuestra galaxia.

Desde 2003 se han descubierto varios regueros estelares en torno a la Vía Láctea. Sus propiedades parecen confirmar la teoría de formación jerárquica de estructuras, según la cual nuestra galaxia creció por agregación sucesiva de otras de menor tamaño.

El análisis de las propiedades orbitales y químicas de las estrellas de la Vía Láctea ayudará a identificar corrientes estelares disueltas hace tiempo. En última instancia, estas investigaciones revelarán cómo se formaron las primeras galaxias del universo.

PÁGINAS ANTERIORES: BABAK TAFRESHI, *NATIONAL GEOGRAPHIC*

Galaxia enana

Vía Láctea

De galaxia enana a reguero de estrellas

El hallazgo de largas corrientes de estrellas en torno a la Vía Láctea ha apoyado la idea de que nuestra galaxia y otras similares crecieron por agregación sucesiva de galaxias enanas. La formación de un reguero estelar comienza cuando una galaxia de poco tamaño se ve atraída por otra mayor 1. El tirón gravitatorio que esta ejerce resulta mayor en las regiones más próximas, lo que provoca que la galaxia enana se estire poco a poco a lo largo de la línea que la une con su devoradora 2. Al final, las fuerzas de marea arrancan estrellas de la galaxia enana, las cuales forman un reguero estelar independiente 3. Con el tiempo, esas corrientes se expanden y sus estrellas se dispersan. Los regueros estelares más extensos —aquellos formados a partir de galaxias enanas de mayor tamaño— pueden llegar a rodear por completo la galaxia principal 4.

FUENTE: DAVID HENDEL; MARK GARLICK (*ilustración*)

este atrae hacia sí materia ordinaria inicialmente dispersa en forma de gas. A medida que se dirija hacia el centro del halo, y siempre que se den las condiciones adecuadas, dicha materia empezará a formar estrellas. Al final de su vida, algunas de ellas explotarán y dispersarán sus elementos químicos por el espacio, los cuales se mezclarán con el gas interno de la galaxia y, posiblemente, también con el externo. A menudo, el gas y polvo restantes darán lugar a otro ciclo de formación estelar. Se cree que así fue como se formaron el bulbo (la zona central) y el disco (los brazos espirales) de la Vía Láctea.

Pero nuestra galaxia no solo presenta bulbo y disco, sino que exhibe también una vasta esfera de estrellas —también llamada «halo»— dispuestas a su alrededor. Buena parte de ellas probablemente procedan de galaxias enanas devoradas en el pasado. Según la teoría de formación jerárquica de galaxias, la secuencia de sucesos que llevaron a esas estrellas a unirse al halo sería la siguiente.

Cuando una galaxia enana orbita alrededor de otra de gran tamaño, la materia de la primera (materia oscura, estrellas, polvo y gas) que se halle más cerca de la segunda experimentará una atracción ligeramente mayor que la situada en el extremo opuesto. Como resultado, la galaxia enana se estirará a lo largo de la línea que la une con su devoradora. Dicho efecto recibe el nombre de deformación por fuerzas de marea, ya que se trata del mismo fenómeno que provoca el flujo y reflujo de los océanos terrestres. Pero, a diferencia de lo que sucede con la interacción entre nuestro planeta y la Luna o el Sol, las fuerzas de marea que ejerce una estructura como la Vía Láctea revisten tal calibre que pueden llegar a arrancar materia de la galaxia enana. Una vez extirpadas, sus estrellas quedarán sometidas a la gravedad de la Vía Láctea, por lo que seguirán una trayectoria ligeramente desviada con respecto a la órbita de la galaxia satélite. Con el tiempo, ese desplazamiento provocará que los escombros se alejen y formen su propia corriente de estrellas.

Por convincente que resulte la explicación anterior, durante largo tiempo los expertos carecieron de pruebas observacionales que la confirmasen. Ahora las tienen. El hallazgo de numerosas corrientes estelares ha revelado que la Vía Láctea comenzó a devorar a sus vecinas hace miles de millones de años, y que continúa haciéndolo aún hoy. Y a pesar de que la mayoría de los indicios disponibles atañen a la Vía Láctea, tales regueros de estrellas probablemente existan en todas las galaxias espirales similares a la nuestra, si bien serían demasiado tenues para detectarlos a distancia.

Con todo, aún ignoramos buena parte de los detalles de dicho proceso jerárquico de crecimiento; entre ellos, cuándo absorbió la Vía Láctea la mayor parte de sus galaxias satélite, con qué frecuencia las devora o cuánto tiempo tarda en incorporar sus estrellas. Para responder a tales preguntas, los astrónomos deberán localizar otros regueros estelares, así como los restos de corrientes desaparecidas.

BÚSQUEDA DE FÓSILES GALÁCTICOS

Son varias las maneras en que pueden buscarse corrientes estelares en la Vía Láctea. La primera y más sencilla consiste en localizar grupos de estrellas más o menos equiespaciadas y dispuestas en forma de largos filamentos. Para ello necesitamos un buen mapa tridimensional de la galaxia, que incluya las posiciones de tantas estrellas como sea posible en todas direcciones.

Durante los últimos 15 años, los arqueólogos galácticos han obtenido esa información gracias al Sondeo Digital del Cielo Sloan (SDSS, por sus siglas en inglés). Este proyecto, al que se ha dedicado en exclusiva uno de los telescopios del Observatorio de Apache Point, en Nuevo México, ha generado una base de datos de más de 80 millones de estrellas de la Vía Láctea distribuidas en una cuarta parte del cielo, con información sobre sus distancias, colores y otras propiedades. El gran número de estrellas presentes en este catálogo ha brindado a los arqueólogos galácticos el yacimiento perfecto donde buscar fósiles.

Se cree que, de los cientos de miles de millones de estrellas de la Vía Láctea, apenas un 1 por ciento procede de otras galaxias. A pesar de ello, el catálogo Sloan ha permitido examinar casi un millón de estrellas intrusas en busca de indicios de galaxias muertas hace largo tiempo. Para ello, se buscaron estrellas situadas a la distancia adecuada para formar parte del halo galáctico. De ellas, se identificaron corrientes al buscar en regiones con una mayor densidad estelar que el resto y que adoptasen forma de cola. Se sabía qué apariencia debían mostrar esas colas gracias, en parte, a las simulaciones por ordenador que en 2005 llevé a cabo junto con James Bullock, cosmólogo de la Universidad de California en Irvine. Al combinar la física de las fuerzas de marea con los modelos de formación jerárquica de halos de materia oscura, logramos predecir el tamaño y la dispersión de las corrientes estelares creadas durante la ingesta de galaxias enanas.

Las primeras pruebas convincentes de una corriente estelar extensa llegaron en 2003. Aquel año, un equipo liderado por Steve Majewski, de la Universidad de Virginia, descubrió colas gigantes que emanaban de Sagitario, la galaxia enana más cercana conocida. El hallazgo fue posible gracias a los datos del Sondeo Celeste en Dos Micras (Two Micron All Sky Survey), un proyecto similar al catálogo Sloan pero que cartografía el firmamento en luz infrarroja. Dichas corrientes se hallan cerca de la órbita de Sagitario, contienen casi tantas estrellas como las que aún quedan en la galaxia enana y son tan extensas que rodean por completo la Vía Láctea. Aquel descubrimiento mostró cómo la Vía Láctea estaba devorando a su vecina más cercana... aunque aparentemente no la más querida.

Desde entonces, el catálogo Sloan ha permitido identificar otra docena de regueros estelares. A la vista de la longitud que presentan las colas de Sagitario, cabe concluir que la galaxia enana lleva unos 2000 o 3000 millones de años perdiendo estrellas. Las otras corrientes avistadas parecen tener una edad similar. Todo ello indica que el apetito de la Vía Láctea fue mayor en el pasado remoto que en la actualidad: en los últimos tiempos, a medida que disminuía el número de satélites a su alrededor, nuestra galaxia parece haber bajado el ritmo de la ingesta. Hasta ahora, estos resultados concuerdan con las predicciones de la teoría de formación jerárquica de estructuras. Pero las corrientes estelares que conocemos probablemente no constituyan más que una pequeña fracción de todas las que existen. Debería haber muchas más, demasiado tenues para verlas por ahora, pero con información clave para entender mejor el pasado de nuestra galaxia.

NUEVOS MÉTODOS DE EXCAVACIÓN

Si solo nos fijamos en la posición de las estrellas, pasaremos por alto muchas de las corrientes estelares más antiguas. En pocos miles de millones de años, las pequeñas diferencias en las órbitas de sus estrellas pueden provocar que los regueros se alarguen, se dispersen y desvanezcan hasta perder toda forma reconocible. Los astrónomos intentan por ello explotar otras características estelares, a fin de identificar corrientes más di-

seminadas, así como los restos de aquellas que se hayan desperdigado por completo. Esa información permitiría investigar la época más activa en la formación de galaxias, la cual tuvo lugar hace más de 10.000 millones de años (pocos miles de millones de años después de la gran explosión), cuando nacieron la mayoría de las estrellas del universo. Fue por aquel entonces cuando cientos de pequeñas galaxias y cúmulos estelares se aglomeraron para formar la Vía Láctea.

Un método para rastrear los escombros de dichas galaxias desaparecidas consiste en buscar estrellas con órbitas comunes. Mucho tiempo después de que las estrellas de una corriente se hayan dispersado, el estudio de su movimiento permite localizar aquellas que una vez formaron parte de la misma galaxia satélite y reconstruir el proceso por el que se unieron a la Vía Láctea. Este es uno de los múltiples objetivos que persigue el satélite Gaia, lanzado en diciembre de 2013 por la Agencia Espacial Europea. Durante los próximos cuatro años, en una iniciativa que promete revolucionar la arqueología galáctica, Gaia medirá las distancias, posiciones y velocidades de más de mil millones de estrellas. Ello permitirá seleccionar astros con propiedades orbitales similares y rastrear su posible origen común, aun cuando sus posiciones celestes ya no reflejen ninguna relación entre ellos.

Hay otra característica que permite inferir la procedencia de una estrella: su composición química. En términos globales, la composición de una estrella cambia a medida que en su interior se van sintetizando elementos pesados a partir de la fusión nuclear de otros más ligeros. Pero tales reacciones solo tienen lugar en el centro del astro, donde la densidad y la temperatura son muy elevadas. Se cree que la atmósfera de una estrella —la parte que los astrónomos pueden medir— sigue siendo idéntica al gas a partir del cual se formó. Kenneth Freeman, de la Universidad Nacional de Australia, y Joss Bland-Hawthorn, de la Universidad de Sídney, se han propuesto sacar partido de esta «memoria», no para localizar corrientes estelares, sino para identificar estrellas con una misma etiqueta química y, a partir de esa información, deducir su cúmulo de origen con independencia de dónde se encuentren hoy.

Por sí sola, esta técnica no servirá para ubicar todos los astros procedentes de una misma galaxia enana, ya que cabe esperar que cada una de ellas contuviese estrellas nacidas en cúmulos diferentes y, por tanto, con composiciones químicas dispares. Sin embargo, unida a lo que sabemos sobre la historia cósmica y los procesos de formación estelar, esa huella química sí podría explotarse para reconstruir la historia de la Vía Láctea.

En una galaxia dada, las estrellas que se formaron más tarde suelen contener una proporción mayor de elementos pesados que aquellas que se gestaron antes, ya que el material a partir del cual se originaron fue enriquecido con los restos de las generaciones estelares precedentes. Por otro lado, el modo en que tiene lugar ese proceso depende de los flujos de gas, gobernados en parte por la influencia gravitatoria del halo de materia oscura de la galaxia. Estos dos efectos sugieren que las galaxias con masas similares y que fueron engullidas hacia la misma época deberían haber aportado estrellas con una *distribución* de composiciones químicas parecida; es decir, con una dispersión semejante en las abundancias químicas de los distintos elementos. En cambio, las galaxias con masas diferentes o que fueron absorbidas en momentos distintos habrían cedido estrellas con distribuciones químicas diversas. Así pues, un estudio sobre la distribución de composiciones químicas de las estrellas que rodean a la Vía Láctea podría ayudarnos a discernir qué fracción de ellas procede, si no de la misma galaxia, sí al menos de galaxias con masas similares y que se incorporaron hacia la misma época.

Duane Lee investigó esta idea cuando realizaba su doctorado en nuestro grupo de la Universidad de Columbia. Sus resultados preliminares sugieren que las etiquetas químicas podrían contener información suficiente para rastrear incluso las contribuciones de las galaxias enanas más pequeñas, desmembradas durante los primeros estadios de la historia de la Vía Láctea. Si supiésemos qué fracción de estrellas se incorporó en cada momento, podríamos esbozar una secuencia de los actos de canibalismo de nuestra galaxia y remontarnos a sus primeras fases. En la actualidad, dos iniciativas se han propuesto medir la composición química de millones de estrellas: el proyecto Arqueología Galáctica con HERMES (GALAH, por sus siglas en inglés) dirigido por Freeman y Bland-Hawthorn y que ya cuenta con un estudio piloto en curso, y el Experimento de Evolución Galáctica del Observatorio de Apache Point (APOGEE), que inició su andadura en 2011 como parte del sondeo Sloan.

Los arqueólogos galácticos han comenzado a entender que investigar la Vía Láctea equivale a estudiar unas mil galaxias, pues la primera se formó por agregación de las segundas. Sus restos no solo nos permiten atisbar en la historia de nuestro rincón cósmico, sino también en la de las galaxias enanas que perecieron en él. Pronto podremos entender el proceso por el que múltiples galaxias de tamaños diferentes se gestaron en distintas épocas de la historia cósmica, y todo ello sin salir de nuestro laboratorio local. En la próxima década, cabe esperar que este campo de investigación nos ayude a entender la formación de galaxias tanto como en los últimos años lo ha hecho el hallazgo de corrientes estelares en torno a la Vía Láctea.

En última instancia, nos gustaría saber cómo se formaron las primeras galaxias del universo. En el momento actual de la historia cósmica, los progenitores de las galaxias similares a la nuestra se encuentran demasiado lejos para detectarlos por medios directos. A pesar de ello, la arqueología galáctica quizá nos permita desenterrar los restos de esas semillas. Al fin y al cabo, las viejas estrellas que aún llevan la impronta de sus orígenes se encuentran dispersas a nuestro alrededor. Al excavar en nuestro jardín, tal vez obtengamos pistas sobre el universo temprano y los primeros estadios de la formación de galaxias. Una ventana a la que resultaría imposible acceder de otra manera.

PARA SABER MÁS

Tracing the Milky Way's history. Cristina Chiappini en *Sky & Telescope*, vol. 108, n.º 4, págs. 32-40, octubre de 2004.

Tracing galaxy formation with stellar halos I: Methods. James S. Bullock y Kathryn V. Johnston en *The Astrophysical Journal*, vol. 635, n.º 2, diciembre de 2005. Disponible en **arxiv.org/abs/astro-ph/0506467**

Tracing galaxy formation with stellar halos II: Relating substructure in phase and abundance space to accretion histories. Kathryn V. Johnston et al. en *The Astrophysical Journal*, vol. 689, n.º 2, diciembre de 2008. Disponible en **arxiv.org/abs/arXiv:0807.3911**

Página web del sondeo Sloan: **www.sdss.org**

Página web de la misión Gaia: **sci.esa.int/gaia**

EN NUESTRO ARCHIVO

La huella de galaxias destruidas. Rodrigo Ibata y Brad Gibson en *IyC*, junio de 2007.

Galaxias enanas en la red cósmica. Noam I. Libeskind en *IyC*, mayo de 2014.



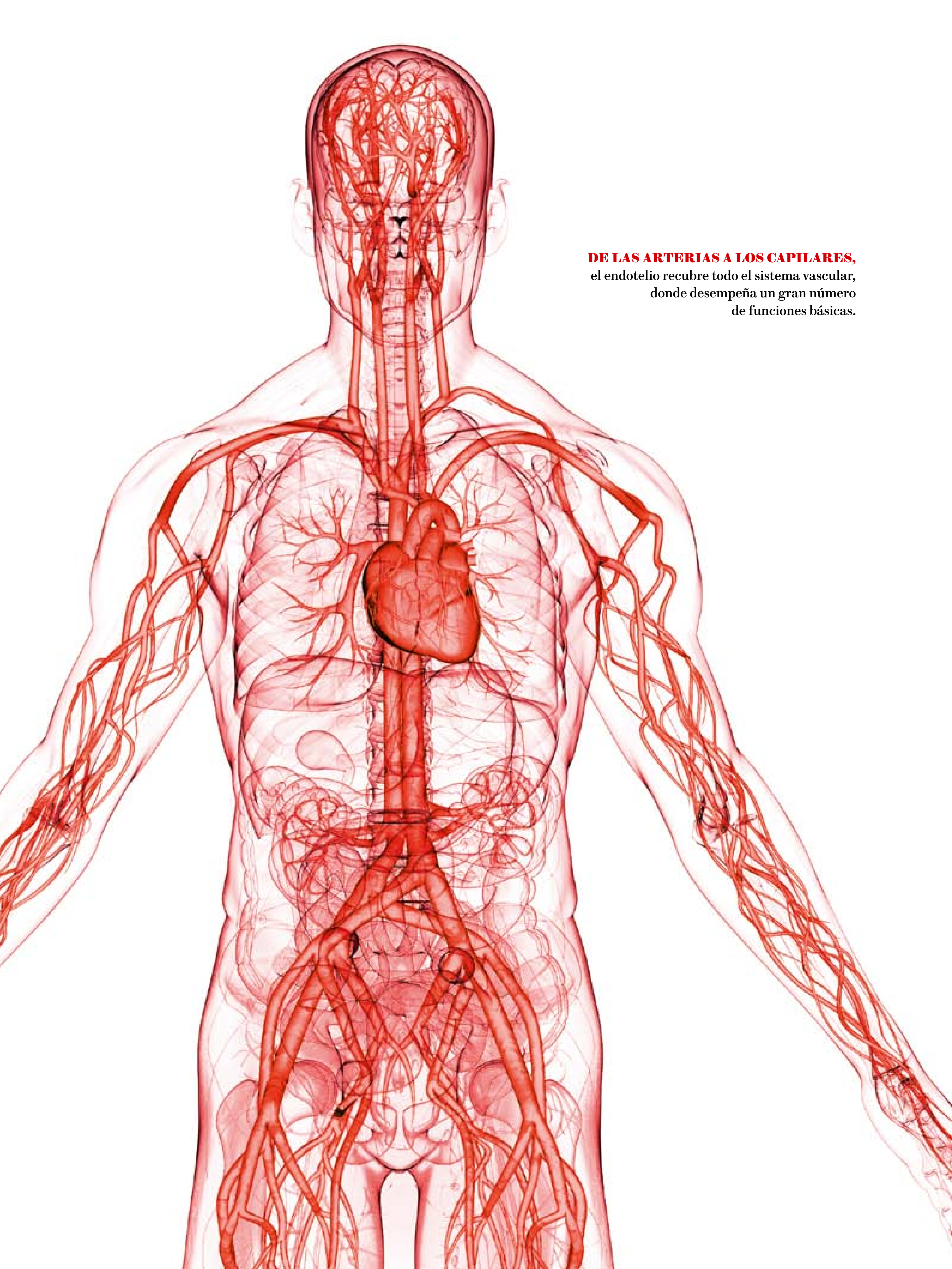
MEDICINA

EL ENDOTELIO, UN ÓRGANO CLAVE

El tejido que tapiza el interior de venas y arterias desempeña tantas funciones básicas que su daño puede perjudicar gravemente la salud. Conocer las marcas moleculares de esta alteración facilitaría la prevención y el tratamiento de numerosas enfermedades

Marta Palomo, Enric Carreras y Maribel Díaz Ricart

THINKSTOCK/SEBASTIAN KAULITZKI



DE LAS ARTERIAS A LOS CAPILARES, el endotelio recubre todo el sistema vascular, donde desempeña un gran número de funciones básicas.

Marta Palomo, doctora en fisiología por la Universidad de Barcelona, es investigadora posdoctoral en el grupo de investigación del endotelio Barcelona Endothelium Team (BET), en el Instituto de Investigación contra la Leucemia Josep Carreras. Colabora como periodista científica en varios medios e instituciones.

Enric Carreras fue director del Programa de Trasplante Hematopoyético del Hospital Clínico de Barcelona de 1995 a 2010. En la actualidad se dedica al estudio de la disfunción endotelial en el trasplante hematopoyético en el grupo BET y dirige el Registro de Donantes de Médula Ósea de la Fundación Josep Carreras.

Maribel Díaz Ricart es doctora en farmacia y consultora del Hospital Clínico de Barcelona. Desarrolla su actividad investigadora en el grupo BET, donde se centra en los mecanismos que llevan a la disfunción del endotelio en respuesta a patologías de gran prevalencia.

AUNQUE NUESTRA SALUD DEPENDE EN GRAN MEDIDA DE SU CORRECTO FUNCIONAMIENTO, estamos convencidos de que usted, estimado lector, no ha oído hablar de él. Nos referimos al órgano más grande del cuerpo humano. Aquel que, si pudiera extenderse, cubriría la superficie de un campo de fútbol reglamentario: entre 4000 y 7000 metros cuadrados. Su peso no es menos impresionante: alrededor de un kilogramo, casi como nuestro cerebro. Y se halla implicado, si no en todas, en la mayoría de las enfermedades que podemos sufrir a lo largo de la vida. Se trata del endotelio, el conjunto de células que recubren por dentro todas y cada una de nuestras venas, arterias y capilares; con más de diez billones de ellas, llega a todos los rincones del cuerpo.

Las células endoteliales forman una monocapa que tapiza todo el sistema vascular. Se caracterizan por una morfología alargada (unos 30 micrómetros de largo, 12 de ancho y 0,3 de alto) y una polaridad apical-basal (arriba-abajo), que se traduce en una distribución asimétrica de sus funciones. Ello les permite secretar distintas proteínas y mediadores químicos hacia la matriz extracelular (exterior de los vasos) y hacia el torrente sanguíneo (interior de los vasos).

Hasta hace poco, se pensaba que ese extenso tejido tenía un único cometido: contener la sangre, es decir, evitar que el preciado fluido se derramara. Ahora, en cambio, el endotelio se postula como un órgano con un gran número de funciones y, por tanto, con un enorme potencial como diana farmacológica en numerosas enfermedades.

No obstante, existe todavía una gran brecha entre los descubrimientos realizados en el laboratorio y sus aplicaciones médicas. En parte, ello se debe a que el endotelio es un órgano de difícil acceso. No puede estudiarse mediante las técnicas tradicionales (no puede auscultarse, ni palparse, ni inspeccionarse) ni se conocen todavía marcadores moleculares que permitan valorar su estado a partir de un análisis de sangre. Otro de los factores que dificultan el desarrollo clínico de los hallazgos científicos corresponde a la heterogeneidad y variabilidad de este órgano: cada una de las células endoteliales tiene su propia identidad, y sus características cambian en el espacio y el tiempo, y en la salud y en la enfermedad.

UN ABANICO DE FUNCIONES

El hecho de contar con células sutilmente distintas en sus filas, permite al endotelio desempeñar todo un abanico de funciones básicas para la vida: regula el paso de células y fluidos entre la sangre y los tejidos, modula el flujo sanguíneo y el tono vascular, controla la coagulación de la sangre y participa en la generación de nuevos vasos (angiogénesis).

EN SÍNTESIS

El endotelio es nuestro órgano de mayor tamaño. Lo conforman miles de millones de células que recubren el interior de venas, arterias y capilares. Contiene la sangre, modula el tono vascular, regula el paso de células y fluidos hacia los tejidos, controla la coagulación sanguínea y participa en la generación de nuevos vasos.

Al desempeñar tantas funciones, está implicado en numerosas enfermedades. Ello le confiere un gran potencial como diana farmacológica. Sin embargo, la dificultad para valorar el daño endotelial hace que el conocimiento adquirido en el laboratorio tarde en trasladarse a la práctica médica.

Nuevos estudios sobre las alteraciones que presenta este órgano en diversas patologías permiten avanzar en la búsqueda de marcadores moleculares que faciliten el diagnóstico del daño endotelial y, por tanto, su prevención y tratamiento.

Según el grosor, cada vaso se especializa en una tarea. Las finas venas en las que se convierten los capilares (venas poscapilares) son muy porosas y regulan el paso de los leucocitos de la sangre a los tejidos. Las anchas arterias, en cambio, son las responsables del tono vasomotor, es decir, la tensión del árbol vascular.

Cual camaleón, el endotelio cambia el fenotipo de sus células para adaptarse a las necesidades del entorno. Desde el punto de vista evolutivo, esta capacidad de adaptación tiene un origen muy remoto. En 2007, un equipo de la Escuela de Medicina de Harvard encabezado por Kiichiro Yano descubrió que habría aparecido hace unos 500 millones de años en un ancestro común a todos los vertebrados actuales. Llegaron a esta conclusión tras hallar este comportamiento en un pez de la familia de los Aghatos, considerado uno de los vertebrados más primitivos que existen. El hecho de que este rasgo se halle tan conservado indica que se trata de una característica definitoria del órgano y que reviste gran importancia evolutiva.

Dejemos, pues, de pensar en el endotelio como una barrera inerte que contiene la sangre y contemplémoslo como un órgano con múltiples funciones que, como tal, puede estar sano o enfermar. Ahora bien, ¿cómo interacciona este órgano con su entorno? ¿Cuáles son los mecanismos que le permiten responder a las necesidades fisiológicas de cada momento?

¿UN SIMPLE INTERRUPTOR?

Jordan S. Pober y Michael A. Grimbrone, entonces en la Escuela de Medicina de Harvard, fueron los primeros en demostrar, en el año 1982, que el endotelio tenía capacidad de respuesta. Estos investigadores describieron que cierto estímulo inducía la expresión de E-selectina en la superficie de las células endoteliales; esta proteína permite que los leucocitos circulantes, los responsables de mediar la respuesta inflamatoria, interaccionen con las paredes del vaso sanguíneo y se vayan frenando hasta detenerse, para dirigirse luego al tejido u órgano en donde se los necesita [*véase el recuadro* «Reclutamiento de leucocitos»].

En estudios posteriores se descubrió que ciertos mediadores inflamatorios (sustancias como interleucinas o el factor de necrosis tumoral) también provocaban que las células endoteliales expresaran en la superficie nuevas moléculas, que fueron llamadas antígenos de activación. Esta reacción implicaba que el endotelio pasaba de un estado de reposo, o basal, en el que no se adherían los leucocitos y no se producía coagulación sanguínea (un proceso que guarda una estrecha relación con la inflamación), a otro activo que potenciaba la adhesión de los leucocitos y favorecía la coagulación.

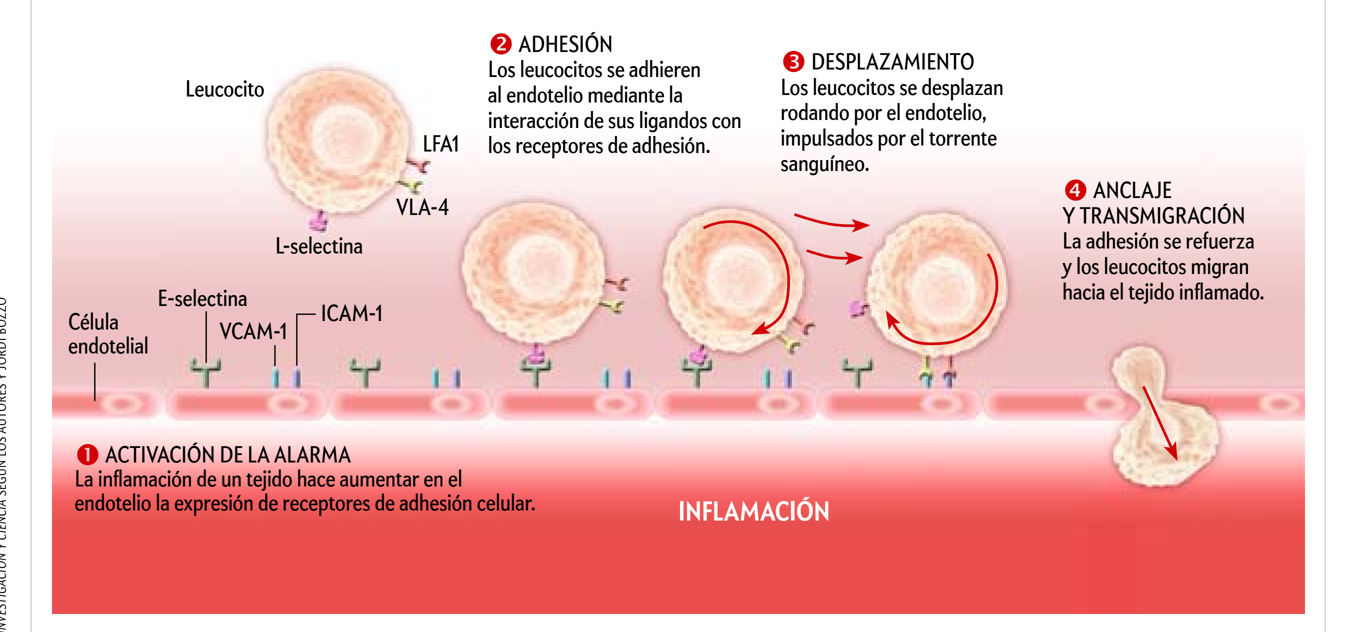
Aunque nunca fue la intención de Pober y Grimbone, esas observaciones llevaron a pensar que el endotelio se comportaba como un simple interruptor: «apagado» cuando las célu-

COMBATIR LA INFLAMACIÓN

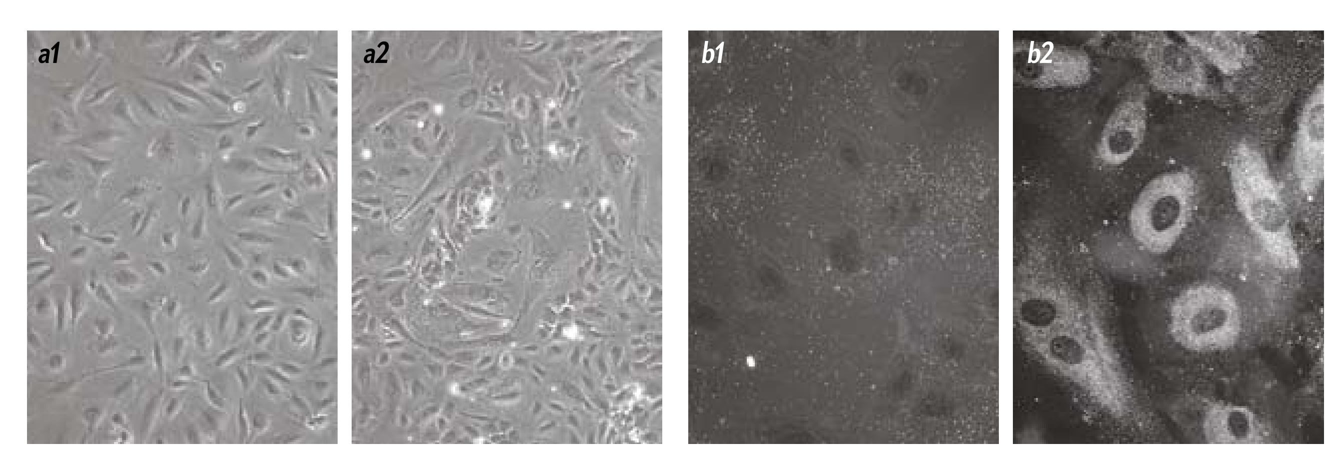
Reclutamiento de leucocitos

Las células del endotelio, así como las de todo organismo pluricelular, se reconocen y se unen entre sí mediante moléculas específicas denominadas moléculas de adhesión celular (CAM, por sus siglas en inglés). Las CAM participan en importantes procesos biológicos, como el reconocimiento de antígenos, la activación de los linfocitos T o el inicio de la respuesta inmunitaria, pero destacaremos aquí su papel en las funciones de los leucocitos, las células de la sangre que median la inflamación.

Cuando se produce una inflamación ❶, las células endoteliales incrementan la expresión de receptores de adhesión celular (E-selectina, VCAM-1, ICAM-1). Los leucocitos se adhieren entonces a la superficie vascular ❷ mediante los ligandos presentes en su superficie (L-selectinas), en una unión de baja intensidad que les permite rodar y desplazarse a lo largo del endotelio ❸. Más adelante, las integrinas (VLA-4, LFA1) refuerzan la adhesión de los leucocitos, que se anclan e inician su transmigración hacia el tejido inflamado ❹.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA SEGÚN LOS AUTORES Y JORDI BOZZO



SEÑALES CELULARES DE OBESIDAD: Estas cuatro imágenes de cultivos celulares obtenidas por microscopía óptica permiten observar las diferencias entre un endotelio sano y otro «obeso». A la izquierda (40x), las células de control (*a1*) presentan un crecimiento regular y homogéneo; en cambio, en el cultivo expuesto al medio adiposo de un paciente obeso (*a2*) se observa una morfología extraña, un crecimiento acelerado y desordenado, y señales de inflamación (la inflamación se mide a partir de la expresión del receptor de adhesión VCAM-1; los puntos blancos corresponden a partículas de oro unidas a un anticuerpo que, a su vez, se une de manera específica a VCAM-1). A la derecha (320x), la diferencia resulta todavía más evidente: mientras que las células del tejido de control (*b1*) no se hallan inflamadas, las del tejido enfermo (*b2*) presentan claramente señales de inflamación.

CORTESÍA DE LOS AUTORES

las se hallaban en reposo (quiescentes) y «encendido» cuando se activaban.

Hoy en día, esa visión tan simplista ha quedado atrás. Sabemos que el endotelio se halla siempre «encendido», dado que tiene muchas tareas que cumplir y que es capaz de adaptarse a los cambios. Los conceptos que nos ayudan a comprender el funcionamiento de este órgano dinámico son más bien los de «activación» y «disfunción». Hablamos de activación endotelial cuando, al recibir un estímulo intenso y prolongado, el tejido pasa de manera temporal a un estado que favorece la adhesión leucocitaria y la coagulación. Se trata de una respuesta fisiológica normal y no implica ningún riesgo para el organismo. Cuando el endotelio sufre un daño y no responde de manera adecuada, se produce, en cambio, una disfunción endotelial. Ello entraña graves cambios funcionales y estructurales, muchas veces irreversibles, que resultan deletéreos para la persona o el animal. Esta alteración subyace a numerosos trastornos, entre los que destacan las enfermedades coronarias, principal causa de muerte en el mundo y también en España.

DETECTAR LA DISFUCIÓN

Puesto que, como acabamos de ver, la disfunción endotelial puede constituir un indicador temprano de trastorno cardiovascular, laboratorios de todo el mundo están buscando señales para detectarla. Hoy por hoy, todavía no disponemos de ningún marcador universal. Las estrategias que se utilizan para avanzar en este campo pueden diferenciarse en dos grandes grupos: el análisis de marcadores plasmáticos y el uso de técnicas experimentales como los cultivos celulares y los modelos animales que se utilizan en los laboratorios de investigación.

Ante cualquier agresión, las células de un organismo reaccionan mediante la secreción de marcadores plasmáticos, es decir, moléculas suspendidas en la sangre que intervienen en la reacción inflamatoria y nos permiten valorar el tipo de célula implicada, así como el grado y el curso de la inflamación. Los marcadores más utilizados son dos. Por un lado, los receptores de adhesión leucocitaria (como VCAM-1, de «molécula de adhesión a las células vasculares» en inglés), que indican que el endotelio aumenta su capacidad de adhesión a leucocitos. Por otro, el factor de von Willebrand (una glucoproteína cuyo déficit descubrió en 1962 el médico finlandés Erik von Willebrand y que interviene en el momento inicial de la hemostasia, el conjunto de fenómenos fisiológicos que previenen y detienen las hemorragias), que marca un estado más proadhesivo todavía.

Asimismo, se mide la concentración en sangre de células endoteliales circulantes (CEC), células que han perdido capacidad adhesiva tras morir (por apoptosis o necrosis) y se han desprendido de la matriz; se ha demostrado que el número de CEC aumenta tras un infarto de miocardio. También se tienen en cuenta los progenitores endoteliales circulantes (PEC); algunos estudios sugieren que la presencia de PEC podría guardar relación con la capacidad regenerativa del endotelio.

Por ahora, el principal problema de intentar valorar el daño endotelial mediante el análisis de marcadores es que la concentración de estas moléculas varía mucho de un paciente a otro y según la enfermedad. Todavía no existe un consenso sobre cómo utilizar estas sustancias para el diagnóstico y el pronóstico.

Hablemos ahora de otro de los métodos que empleamos en los laboratorios para estudiar el comportamiento del endotelio: el cultivo celular. Esta herramienta nos permite reproducir in vitro las condiciones en las que las células se encuentran in vivo. El aislamiento de células endoteliales y su crecimiento en cultivo lo logró por vez primera en 1973 Eric A. Jaffe en el Hospital de Nueva York, un hito que marcó el principio de la biología vascular moderna. En la actualidad, casi todo el conocimiento que se tiene del endotelio, desde los receptores de superficie hasta las reacciones bioquímicas que ocurren su interior, procede de los cultivos celulares.

Si bien los cultivos no ofrecen una visión completa del endotelio —no tienen en cuenta la localización vascular y el dinamismo de este órgano en su totalidad—, constituyen un buen modelo para ahondar en los mecanismos que originan y desarrollan la activación y la disfunción endoteliales. En nuestro laboratorio hemos empleado esta técnica para arrojar luz sobre el papel del endotelio en los trastornos vasculares asociados a la obesidad, entre otras patologías.

ENDOTELIO Y OBESIDAD

En los países occidentales, la incidencia de la obesidad ha aumentado de tal manera que la Organización Mundial de la Salud ha llegado a clasificarla de pandemia. Se sabe que las personas obesas sufren más episodios cardiovasculares que la población de peso normal; ello se debe a un estado de inflamación crónica y a una aterosclerosis acelerada, en la que una placa de grasa, colesterol y otras sustancias se deposita en el interior de las arterias y puede llegar a obstruirlas. En los últimos años, ha empezado a verse que la disfunción endotelial constituye la primera etapa de este proceso aterosclerótico. Además, la obesidad también guarda relación con otras enfermedades, como la hipertensión, la resistencia a la insulina y la diabetes mellitus, todas ellas asociadas al daño endotelial.

El tejido adiposo secreta adipocinas, y el exceso de grasa propio de la obesidad causa la disfunción de estas moléculas. Mediante el cultivo de células endoteliales expuestas a las proteínas secretadas (secretoma) por el tejido adiposo de pacientes obesos y de personas sin sobrepeso (sujetos de control), nuestro equipo, junto con otros investigadores, ha observado que existe daño endotelial asociado a la obesidad. Veamos en qué consiste este daño.

Las células endoteliales del cultivo «obeso» presentan varias alteraciones. Por un lado, crecen de manera acelerada y poseen una forma extraña. Por otro, se produce en su superficie un aumento de la expresión de los receptores de adhesión, característicos de procesos inflamatorios. Y la matriz extracelular que generan es mucho más reactiva a las plaquetas y, por tanto, más proclive a la formación de coágulos (trombogénica). Estos cambios, junto con la activación de proteínas de señalización implicadas en procesos inflamatorios, ofrecen una radiografía de algunos de los mecanismos

VERSATILIDAD Y DINAMISMO

Mucho más que un contenedor

Hasta hace poco se pensaba que el endotelio, el órgano que recubre el interior de todas nuestras venas y arterias, era solo una barrera inerte cuyo único cometido era contener la sangre. Ahora sabemos, en cambio, que desempeña muchísimas más funciones de vital importancia para el organismo.

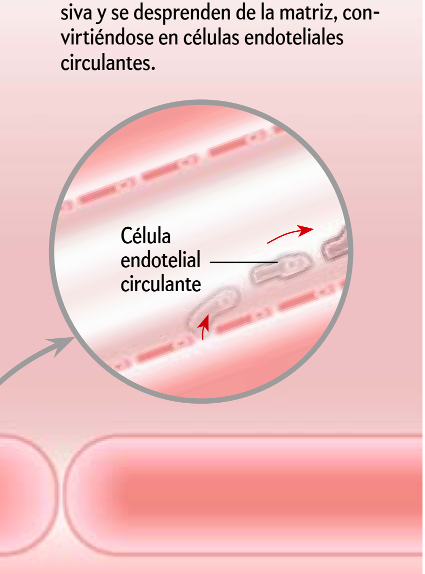
Ello lo consigue gracias a la amplia capacidad de respuesta de las células que lo conforman, que reaccionan ante múltiples cambios del entorno. Cuando reciben un estímulo, se activan o desactivan numerosas proteínas de su interior, lo que da lugar a toda una cascada de señales bioquímicas que culminan en la liberación de moléculas en la superficie celular, hacia el torrente sanguíneo y hacia la matriz extracelular a la que está anclada. Estas rutas bioquímicas afectan a tres funciones biológicas principales: la coagulación de la sangre, la inflamación y el ciclo de división de las propias células endoteliales.

COAGULACIÓN
Cuando se produce una lesión en un vaso sanguíneo, las células del endotelio liberan moléculas como el factor de von Willebrand (FvW) y el factor tisular (FT), que promueven la agregación de plaquetas, evitando con ello una hemorragia.

INFLAMACIÓN
Cuando se produce una inflamación, las células endoteliales aumentan la expresión de E-selectina, VCAM-1 e ICAM-1, proteínas que promueven el reclutamiento de los leucocitos y facilitan la migración de estos hacia los tejidos que requieren su presencia.

DIVISIÓN CELULAR
Cuando las células captan estímulos dañinos (presencia de ciertos fármacos o ausencia de oxígeno, entre otros), pueden alterar su ciclo de división acelerándolo, ralentizándolo o incluso provocando su propia muerte. En este último caso pierden la capacidad adhesiva y se desprenden de la matriz, convirtiéndose en células endoteliales circulantes.

Plaquetas
LESIÓN
Leucocitos
INFLAMACIÓN
FT
FvW
E-selectina
VCAM-1
ICAM-1
CÉLULA ENDOTELIAL
MATRIZ EXTRACELULAR



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA SEGÚN LOS AUTORES Y JORDI BOZZO

que subyacen a la disfunción endotelial causada por el exceso de tejido adiposo.

La obesidad no es el único trastorno que guarda relación con un mal funcionamiento del endotelio. Este órgano presenta alteraciones —si no como causa, como daño colateral— en casi todas las enfermedades conocidas. Un claro ejemplo corresponde a la insuficiencia renal crónica terminal (IRCT): el endotelio de los pacientes con IRCT se halla en continua exposición a los tóxicos urémicos, lo que hace que sufran una aceleración de la aterosclerosis y complicaciones trombóticas prematuras.

También la depresión podría hallarse asociada a una disfunción endotelial. Por ahora sabemos que esta enfermedad, caracterizada por una deficiencia en el neurotransmisor serotonina, está relacionada con un estado inflamatorio y con un mayor riesgo de alteraciones cardiovasculares. Los pacientes deprimidos presentan niveles elevados de citocinas inflamatorias en sangre. Además, la serotonina actúa como agente proinflamatorio en diferentes trastornos, por lo que se piensa que los fármacos que inhiben su recaptación y que se prescriben de manera habitual a pacientes con depresión podrían incrementar la presencia de esta molécula en sangre y, por ende, la inflamación.

DIANA TERAPÉUTICA

Por su naturaleza, el endotelio constituye una diana terapéutica muy atractiva para la biomedicina. Por un lado, las células endoteliales se muestran tremendamente adaptables a los cambios del entorno y, por tanto, podrían modularse con cierta facilidad. Por otro, al hallarse en contacto con el torrente sanguíneo, es un órgano al que puede accederse de manera rápida. Además, gracias al diálogo constante que existe entre el endotelio y los tejidos circundantes, representa una vía de comunicación directa con todos y cada uno de los órganos del cuerpo.

Pero no todo son ventajas. El hecho de que el endotelio sea tan ubicuo dificulta su tratamiento mediante fármacos, ya que una reacción puede resultar beneficiosa en un zona del organismo y, al propio tiempo, nefasta en otra. Por ejemplo, el bloqueo de la interacción entre leucocitos y endotelio en la circulación del corazón puede frenar el proceso aterosclerótico de un individuo obeso pero, a la vez, dejar que avance una infección letal en la microcirculación de cualquier otro órgano. Con todo, el desarrollo de medicamentos para reparar el daño endotelial está arrojando resultados alentadores.

Un ejemplo corresponde al Defitelio, un anticoagulante comercializado por la firma estadounidense Jazz Pharmaceuticals/ Gentium que se compone de una mezcla de nucleótidos obtenidos a partir de mucosa intestinal porcina. Está indicado para el tratamiento de determinadas alteraciones asociadas al trasplante de progenitores hematopoyéticos (células madre de la sangre) o TPH, una terapia que se aplica a los pacientes cuya médula produce células malignas. En estos casos, la médula del enfermo es destruida mediante quimio y radioterapia, y luego reemplazada por una médula sana, que puede proceder de un donante, familiar o no emparentado. Con ello se logra que las células progenitoras del donante generen de nuevo las de la sangre del receptor (eritrocitos, leucocitos y plaquetas).

Debido a las repetidas agresiones que sufren los órganos y tejidos a lo largo del proceso, el TPH entraña ciertos riesgos para el paciente. Gracias a numerosos estudios sabemos que la disfunción endotelial es la causa de algunas de estas alteraciones, como el síndrome de oclusión sinusoidal (en el que se obstruyen las venas hepáticas), y se sospecha que también podría estar detrás de la enfermedad injerto contra receptor (que sucede cuando el material trasplantado ataca el cuerpo del receptor). La Agencia Europea del Medicamento aprobó en octubre de 2013 la indicación del Defitelio como tratamiento del síndrome de oclusión sinusoidal asociado al TPH.

Aunque todavía no conocemos al detalle todos los mecanismos moleculares de acción del fármaco, cada vez tenemos más pruebas de su efecto protector del endotelio. En 2011, una investigación llevada a cabo por nuestro equipo demostró que el Defitelio ejercía un claro efecto antiinflamatorio y antitrombótico en un cultivo de células endoteliales. Se expusieron estas a ciclosporina, una de las drogas suministradas a los pacientes que reciben un trasplante y que causa disfunción endotelial. Tras desprender las células endoteliales, se obtuvo la matriz extracelular que habían generado y se expuso a sangre circulante para analizar su trombogenicidad mediante la medida de la interacción de las plaquetas con el subendotelio. El tratamiento con ciclosporina generó una matriz muy reactiva, con un gran número de contactos y agregados plaquetarios. Con Defitelio, en cambio, la matriz generada presentó una trombogenicidad normal. El fármaco disminuía la expresión de receptores de adhesión y la trombogenicidad de la matriz extracelular. Además, se comprobó que estos efectos tenían lugar en distintos tipos de endotelio (macrovascular y microvascular) y se determinaron algunas de las moléculas de señalización implicadas (p38MAPK y Akt).

Esas investigaciones abren la posibilidad de aplicar el Defitelio como tratamiento preventivo de otras complicaciones asociadas al trasplante de progenitores hematopoyéticos. También se contempla la posibilidad de utilizarlo en otros escenarios con daño endotelial.

Todo apunta, pues, a que en el futuro oiremos hablar mucho de este gran —en sentido literal— y complejo órgano. Los entresijos de cómo funciona, por qué deja de hacerlo y cómo repararlo ya están en el punto de mira de numerosas líneas de investigación y pronto traspasarán al saber popular. Cuando ello ocurra, confiamos en que el lector saque provecho de este texto y se sienta un poco más familiarizado con el endotelio, este precioso órgano denominador común de la salud y de un gran abanico de enfermedades.

PARA SABER MÁS

Defibrotide prevents the activation of macrovascular and microvascular endothelia caused by soluble factors released to blood by autologous hematopoietic stem cell transplantation. Marta Palomo et al. en *Biology of Blood and Marrow Transplantation*, vol. 17, n.º 4, págs. 497-506, abril de 2011.

Translational evidence of endothelial damage in obese individuals: Inflammatory and prothrombotic responses. F. A. Hanzu et al. en *Thrombosis and Haemostasis*, vol. 9, n.º 6, págs. 1236-1245, abril de 2011.

The role of the endothelium in the short-term complications of hematopoietic SCT. Enric Carreras y Maribel Díaz Ricart en *Bone Marrow Transplantation*, vol. 46, n.º 12, págs. 1495-1502, diciembre de 2011.

Endothelial cell heterogeneity. William C. Aird en *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, vol. 2, n.º 1, enero de 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

La actividad biológica del endotelio vascular. Salvador Moncada y P. López-Jaramillo en *IyC*, mayo de 1991.

por José María Gómez Gómez

Formaciones biosalinas

Las bacterias crean estructuras complejas donde permanecen en estado de hibernación

La bacteria *Escherichia coli* es un habitante común del intestino de los animales, incluido el de los humanos, y constituye uno de los organismos modelo más estudiados en biología. También es ampliamente conocido el cloruro sódico, la sal común que utilizamos como condimento.

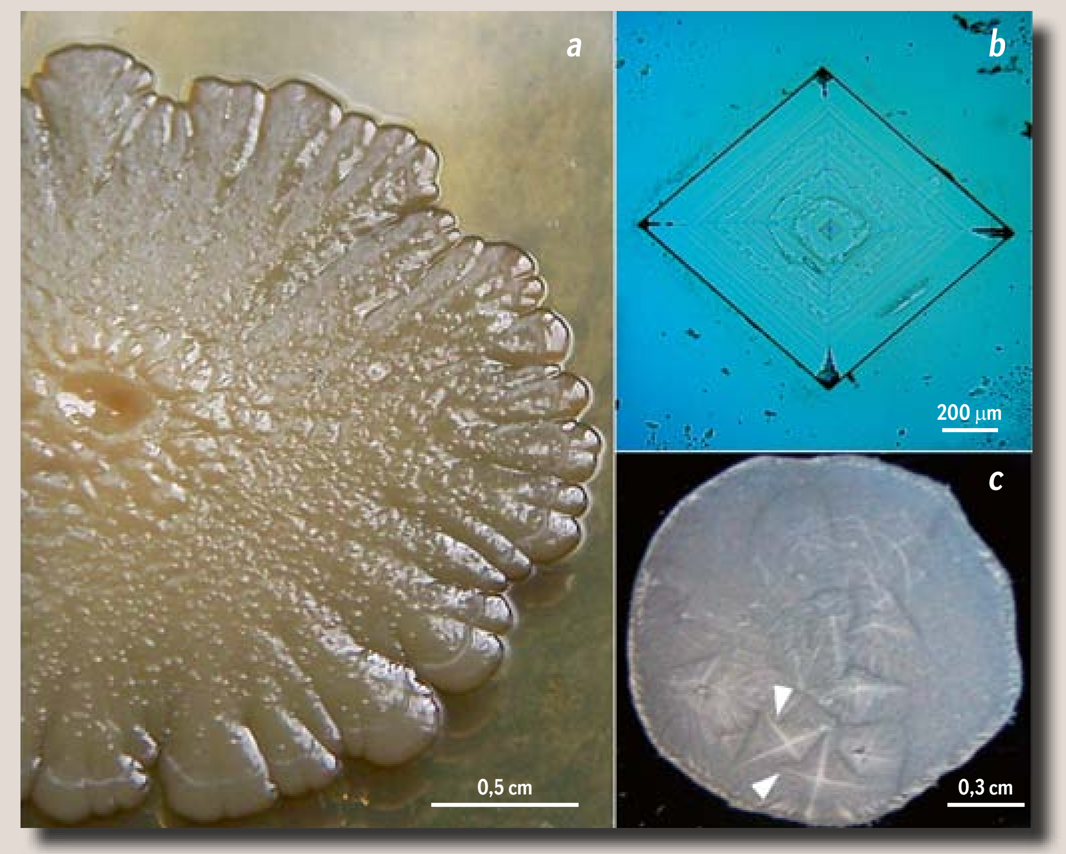
Si introducimos células de *E. coli* en una gota de solución de cloruro sódico a una concentración de 9 miligramos por mililitro, y la dejamos secar por completo a una temperatura ambiente inferior a los 25 grados centígrados, la evaporación del agua pone en marcha la cristalización de la sal. El proceso es controlado por la bacteria, que modula el crecimiento de los cristales salinos para crear unos patrones de secado de enorme complejidad morfológica.

En estas formaciones tridimensionales, fruto de la interacción entre la bacteria y la sal, esta última se dispone como una cubierta biomineralizada que recubre una capa de microorganismos. Ambos componentes, el abiótico y el biótico, adoptan el mismo patrón morfológico.

Según los hallazgos de nuestro grupo, publicados el pasado julio en la revista *Astrobiology*, una característica de gran relevancia desde un punto de vista astrobiológico es que las células bacterianas de esas formaciones entran en un estado de hibernación anhidrobiótico, de tal manera que cuando son rehidratadas recuperan un estado de total vitalidad.

Comprender cómo se autoorganizan estas estructuras, el papel que desempeñan la sal y *E. coli* en ellas, así como los mecanismos fisiológicos que emplea la bacteria para resistir la desecación es el siguiente reto que nos hemos planteado dentro de la iniciativa de investigación astrobiológica *ExoLife*. Esta colaboración entre la Universidad de Valladolid y el Parque Científico y Tecnológico de Guadalajara tiene como objetivo principal estudiar formaciones biomineralógicas que pudieran ser identificadas como señales de vida extraterrestre en lugares que serán explorados en futuras misiones espaciales, como el planeta Marte en la misión Exo-Mars de la Agencia Espacial Europea.

—José María Gómez Gómez
Laboratorio de Investigación en Biomineralogía y Astrobiología
Universidad de Valladolid-CSIC

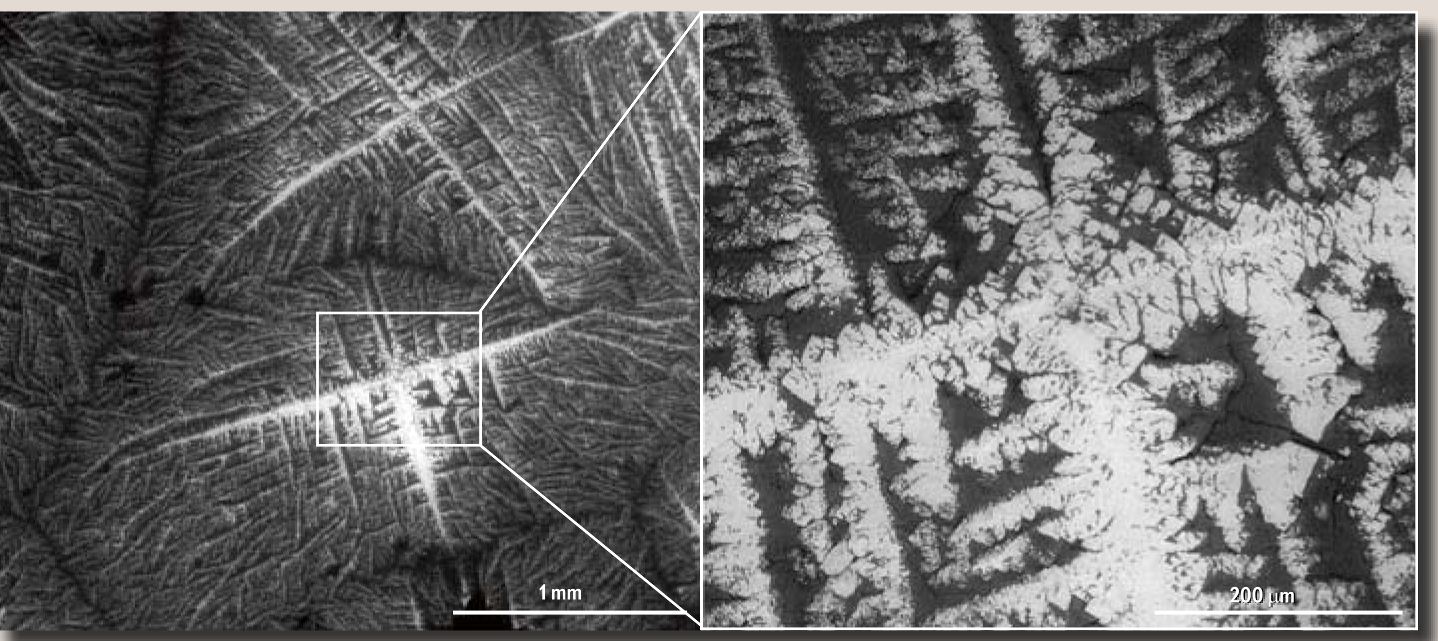


CULTIVADA sobre una superficie de agar, la bacteria *Escherichia coli* forma colonias características (*a*). En nuestros experimentos, tomamos células de una colonia y las mezclamos en una solución de cloruro sódico (NaCl), cuyos cristales presentan una forma típica (*b*). Al hacer desecar una gota de tal solución sobre plástico (poliestireno) se forman patrones biosalinos de secado con simetría en forma de cruz, observables incluso a simple vista (*cabezas de flecha, c*). (Las imágenes *a* y *c* se han obtenido mediante cámara digital, con óptica normal; la *b*, mediante microscopía óptica.)

▶ **EN UNA FORMACIÓN** biosalina de *E. coli* examinada bajo el microscopio óptico se observan distintas regiones morfológicas: un núcleo central (*a*), una zona de tipo fractal (*b*), otra de estructuras de tipo «hojas de helecho» (*d*) y otra de transición entre ambas (*c*).

UNIDAD DE MICROSCOPÍA AVANZADA DE LA FUNDACIÓN PARQUE CIENTÍFICO, UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

▼ **DETALLE DE UNA ZONA CENTRAL** típica (*como la indicada con la letra* a *en la figura superior*), observada mediante microscopía electrónica de barrido. En la ampliación (*inserto*), se distinguen unas áreas oscuras, correspondientes a células bacterianas, y otras claras, correspondientes a la sal.



por Nikolay Zheludev

Nikolay Zheludev es subdirector del Centro de Investigación en Optoelectrónica de la Universidad de Southampton.



La verdadera historia del led

El descubrimiento de los diodos emisores de luz suele atribuirse a investigadores estadounidenses en los años sesenta del siglo XX. Pero los primeros en observar este fenómeno, hace más de cien años, fueron Henry Round, de los Laboratorios Marconi, y Oleg Lósev, un genio ruso olvidado

Artículo recomendado por la Fundación Nobel con motivo del premio Nobel de física otorgado en 2014 a Isamu Akasaki, Hiroshi Amano y Shuji Nakamura por la invención de los ledes azules.

El diodo emisor de luz, o led (de *light-emitting diode*), constituye un elemento clave de la tecnología actual. Los electrodomésticos cuentan con pequeños indicadores luminosos de tipo led, que sirven para leer CD y DVD en ordenadores o consolas, o para transmitir la señal de un control remoto. Cada vez más vehículos están equipados con intermitentes y luces de freno de este tipo. Pero la función más importante que desempeña el led es la de enlazar la electrónica con la fotónica. Láseres semiconductores basados en esta técnica envían señales moduladas a través de cables de fibra óptica, sin los cuales no se podría atender la creciente demanda de telecomunicaciones e Internet de banda ancha. Se estima que el mercado de ledes moverá más de 15.000 millones de dólares por año en la próxima década [*valoración de 2007*].

Pero ¿quién inventó el led, y cuándo lo hizo? Sabemos que el láser semiconductor, que integra un led, fue presentado poco después del primer láser de rubí. En 1962, cuatro grupos de investigación estadounidenses describieron simultáneamente un láser semiconductor de tipo led que funcionaba con cristales de arseniuro de galio. Tres de estos artículos aparecieron en el mismo volumen de *Applied Physics Letters*. Sus autores fueron, entre otros, Robert Hall y Nick Holonyak, de los laboratorios de la empresa General Electric; Marshall Nathan, de IBM, y Robert Rediker, del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Todos ellos se ganaron de este modo un lugar en la historia de la optoelectrónica.



OLEG VLADIMIROVICH LÓSEV, 1903-1942.

WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO

Una figura olvidada

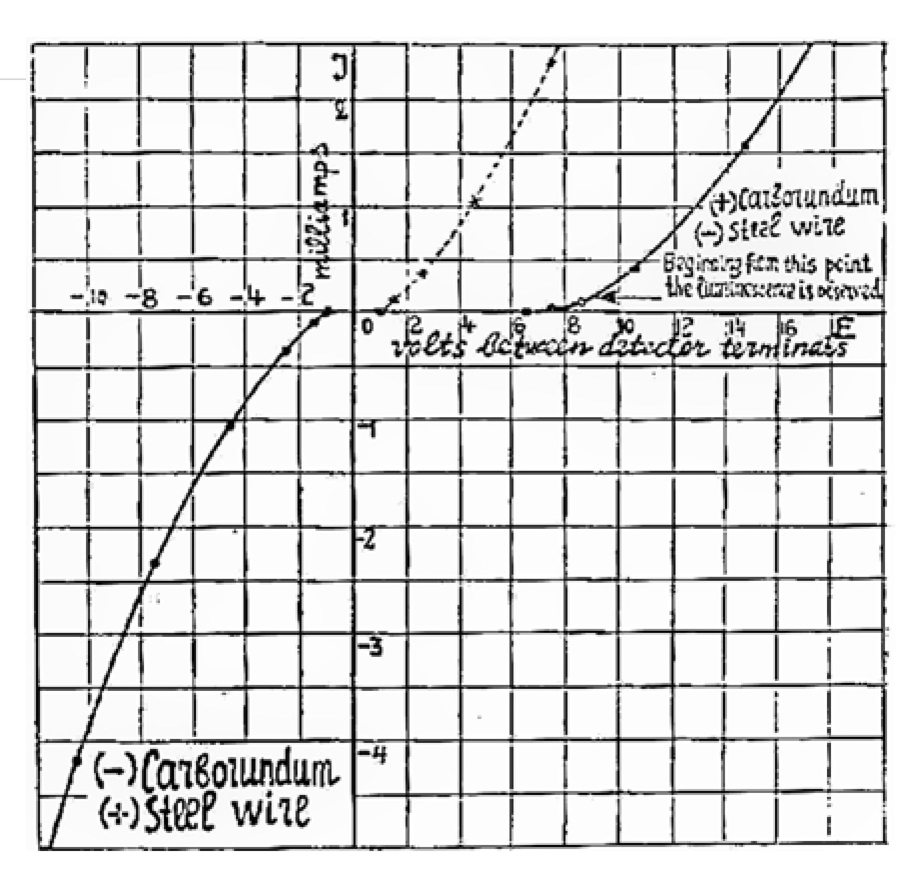
Sin embargo, la historia del inventor del led es menos conocida y más trágica. Oleg Vladimirovich Lósev fue un científico de enorme talento que trabajó como técnico de radio en laboratorios soviéticos y que murió de hambre en 1942, durante el sitio a Leningrado, a los 39 años. Pese a que no había recibido una educación formal, Lósev publicó en su corta carrera 43 artículos en destacadas revistas científicas alemanas, rusas y británicas, y obtuvo 16 patentes a su nombre. Hizo descubrimientos de relieve en electrónica del estado sólido, entre los que se incluye el primer amplificador y generador semiconductor de estado sólido, el *crystadine*.

En 1924, la revista *The Wireless World and Radio Review* dijo de Lósev que «había alcanzado fama mundial en muy poco tiempo gracias a sus hallazgos». Sin embargo, sus contribuciones a la cien-

cia y a la ingeniería han sido olvidadas por la comunidad científica. Contamos con los estudios sobre Lósev realizados por Egon Loebner, miembro del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos y de la embajada de los Estados Unidos en Moscú, y por un grupo de científicos de su ciudad natal, Nizhni Nóvgorod, entre los que destacan M. A. Novikov y A. G. Ostroumov. Si bien la trayectoria personal y científica de Lósev merecería un estudio detallado, este artículo se centrará en la invención del led.

El diodo luminoso

A mediados de los años veinte, Lósev observó que los diodos rectificadores usados en los receptores de radio, compuestos por un cristal de óxido de zinc y carburo de silicio, emitían luz al ser atravesados por una corriente eléctrica. Su primer artículo sobre diodos emisores de carburo de silicio (cuyo título podría traducirse por «Detector luminoso de cristal de carborundo») apareció en 1927 en la revista *Telegrafiya i Telefoniya bez Provodov* («Telegrafía y Telefonía Inalámbrica»), en Nizhni Nóvgorod. Le siguieron otros importantes artículos en revistas británicas (*Philosophical Magazine* en 1928) y alemanas (*Physikalische Zeitschrift* en 1929, 1931 y 1933), que esencialmente constituyen el descubrimiento de lo que conocemos como led. En su primer trabajo, Lósev determinó el umbral de corriente para la emisión de luz desde el punto de contacto entre un cable conductor y un cristal de carburo de silicio, y midió el espectro de la luz emitida. Entre 1924 y 1930 publicó 16 artículos que describían en detalle el fenómeno y avanzaban algunas de sus aplicaciones. Lósev entendió la naturaleza «fría» (no térmica) de la emisión, midió el umbral de corriente, estableció que la emisión led está relacionada con la acción del diodo y midió con precisión las características de corriente y





Класс 21 а, 27

№ 12191

ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

ОПИСАНИЕ

светового реле.

К патенту О. В. Лосева, заявленному 28 февраля 1927 года (заяв. свид. № 14672).

О выдаче патента опубликовано 31 декабря 1929 года. Действие патента распространяется на 15 лет от 31 декабря 1929 года.

Предлагаемое изобретение использует общеизвестное явление свечения в карборундовом детекторе и состоит в том, что в световом реле для быстропишущего телеграфного или телефонного приема, передачи изображений на расстояние и других целей, в качестве модулируемого электрическим током источника света, применяется свечение в точке контакта карборундового детектора, включенного непосредственно в цепь модулирующего тока.

На чертеже фиг. 1 изображает схему предлагаемого светового реле и фиг. 2— схему устройства для фотографической записи сигналов с применением светового реле.

К зажимам *A* источника тока сигналов, подлежащих записи, через потенциометр P включается светящийся карборундовый детектор *D*, в цепь которого включена батарея *B*, дающая дополнительное постоянное напряжение для наложения его на напряжение тока сигналов и усиления действия реле; путем регулировки этой батареи создаются наивыгоднейшие условия работы детектора *D*. Оптическая система *L* предназначена направлять световой поток, излучаемый карборундовым детектором, на движущуюся фотографическую пластинку *F*, на которой производится запись изменений этого потока. Детектор *D*, оптическая система *L* и пластина *F* заключены в светонепроницаемую камеру. Примерное включение светового реле показано на чертеже 2, где *E*— приемник-усилитель высокой частоты, *T*— автотрансформатор высокой частоты, а остальная часть схемы вполне аналогична только-что описанной.

Предмет патента

1. Световое реле для быстропишущего телеграфного или телефонного приема, передачи изображений на расстояние и для других целей, характеризующееся применением, в качестве модулируемого электрическим током источника света, свечения в точке контакта карборундового детектора общеизвестного устройства, каковой детектор включен непосредственно в цепь модулирующего тока.

2. Видоизменение охарактеризованного в п. 1 светового реле, отличающееся тем, что последовательно с указанным детектором *D* включен источник дополнительного напряжения постоянного тока *B* (фиг. 1 и 2) с целью усиления действия реле.

EN 1928, LÓSEV PUBLICÓ un artículo en el que presentaba la relación entre la intensidad (*I*) y el voltaje (*V*) de un detector de carborundo, en la que se indicaba el umbral de emisión de luz (*gráfica*). En 1929 le concedieron una patente (*aquí se muestra la primera página*) que describía un «interruptor de luz» basado en un led; Lósev fue el primero en reconocer el potencial del led para las telecomunicaciones.

FUENTES: «LUMINOUS CARBORUNDUM DETECTOR AND DETECTION EFFECT AND OSCILLATIONS WITH CRYSTALS», *PHILOSOPHICAL MAGAZINE*, VOL. 6, PÁGS. 1024-1044, 1928 (*gráfica*); OLEG V. LÓSEV, PATENTE SOVIÉTICA N.º 12191 (*patente*)

A Note on Carborundum.

To the Editors of Electrical World:

SIRS:—During an investigation of the unsymmetrical passage of current through a contact of carborundum and other substances a curious phenomenon was noted. On applying a potential of 10 volts between two points on a crystal of carborundum, the crystal gave out a yellowish light. Only one or two specimens could be found which gave a bright glow on such a low voltage, but with 110 volts a large number could be found to glow. In some crystals only edges gave the light and others gave instead of a yellow light green, orange or blue. In all cases tested the glow appears to come from the negative pole, a bright blue-green spark appearing at the positive pole. In a single crystal, if contact is made near the center with the negative pole, and the positive pole is put in contact at any other place, only one section of the crystal will glow and that the same section wherever the positive pole is placed.

There seems to be some connection between the above effect and the e.m.f. produced by a junction of carborundum and another conductor when heated by a direct or alternating current; but the connection may be only secondary as an obvious explanation of the e.m.f. effect is the thermoelectric one. The writer would be glad of references to any published account of an investigation of this or any allied phenomena.

NEW YORK, N. Y. H. J. ROUND.

FACSÍMIL de la nota de Henry J. Round sobre destellos de carborundo, el primer fenómeno electroluminiscente observado, en 1907.

voltaje del dispositivo. También estudió la variación de la emisión con la temperatura mediante el uso de aire líquido (predominantemente nitrógeno) y moduló la emisión led hasta la frecuencia de 78,5 kilohercios aplicando al contacto una corriente alterna.

Resulta sorprendente que un joven técnico sin cualificación académica estuviera al corriente de los últimos avances en física. Lósev usó la teoría cuántica de Einstein para explicar el funcionamiento del led, describiendo el proceso de emisión como un «efecto fotoeléctrico inverso». Propuso también la fórmula $\nu = eV/h$, que expresa la frecuencia de la luz emitida en función del voltaje en el contacto del diodo, V, la carga del electrón, e y la constante de Planck, h. La fórmula sigue en pie. Aunque la teoría de bandas de los semiconductores no se había desarrollado todavía, Lósev explicó el efecto a partir de la difracción de ondas de materia, descritas pocos años antes por Louis de Broglie. Según el eminente físico ruso Abram Ioffe, Lósev solicitó ayuda a Einstein para desarrollar su teoría, pero no obtuvo respuesta.

En 1929, Lósev publicó medidas detalladas del espectro led y su variación con la corriente. Es muy interesante revisar estos datos a la luz del conocimiento actual, que nos permite relacionar los cambios en el espectro con la acción del láser. Los artículos de 1962 sobre la acción del láser en diodos de arseniuro de galio no contaban con el respaldo de medidas espectrales. ¿Pudo Lósev observar en 1929 la radiación láser procedente de un led sin comprender su importancia? No es probable que así fuera, pero es significativo que el primer led azul, reinventado hacia 1990, usara carburo de silicio.

La revolución que no tuvo lugar

Lósev percibió el potencial del led para las telecomunicaciones. En la introducción a su patente sobre un «interruptor de luz» (patente soviética n.º 12191), solicitada en 1927 y concedida el 31 de diciembre de 1929, escribió: «Esta invención consiste en la aplicación de un fenómeno conocido, la luminiscencia de un detector de carborundo, a la construcción de un interruptor óptico útil para la comunicación telegráfica y telefónica rápida, la transmisión de imágenes y otras aplicaciones en las que el punto de contacto luminiscente actúa como fuente luminosa conectada directamente a un circuito de corriente modulada». Esta patente desconocida, que no obtuvo ningún reconocimiento, pudo haber inaugurado la revolución fotónica de las telecomunicaciones.

Solo y olvidado

Lósev fue un científico solitario que no tuvo discípulos ni publicó con otros investigadores. Ser el hijo de un oficial noble del Ejército Imperial no era nada ventajoso en la Rusia bolchevique, porque estos antecedentes familiares vetaban el acceso a cualquier profesión. Científico autodidacta, no había atendido más que algunos cursos universitarios; sin embargo, consiguió que el Instituto Ioffe le otorgara un doctorado en 1938 sin presentar formalmente una tesis. Su etapa más feliz y productiva como investigador se desarrolló en el Laboratorio de Radio de Nizhni Nóvgorod. Ya en Leningrado, pasó unos años difíciles hasta conseguir trabajo como técnico en el Instituto Médico de la ciudad.

En su autobiografía, descubierta en fecha reciente, Lósev explica que aun así continuó con sus investigaciones. Descubrió que «es posible construir, usando semiconductores, un sistema con terminales en forma de árbol análogo a un triodo [de vacío]». En noviembre de 1941, con Leningrado bajo sitio, no consiguió hacer llegar un último artículo, que presumiblemente describía un dispositivo de silicio, a la oficina editorial de la *Revista de Física Soviética* (actualmente, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*), en Kazan. ¿Trataba ese artículo sobre lo que hoy conocemos como transistor? No lo sabremos hasta que se descubra el manuscrito. Por desgracia, Lósev cayó en el olvido tras su muerte en Leningrado durante la guerra. Los años de posguerra fueron demasiado difíciles como para que alguien propagara sus conocimientos o investigara el potencial de sus descubrimientos. Engullido por las turbulencias del período, su reputación como uno de los titanes de la física y la ingeniería del siglo xx no llegó a cuajar.

Pioneros de la optoelectrónica

No podemos dejar de mencionar a otro pionero de la investigación de la electroluminiscencia que ha disfrutado de mayor reconocimiento profesional: Henry J. Round, ayudante de Marconi en Inglaterra y, con el tiempo, director de Marconi Research. En febrero de 1907, Round dio cuenta en un breve artículo en *Electrical World* de la emanación de «una luz brillante» por un diodo de carborundo. No hubo más publicaciones sobre el tema y no parece que Lósev supiera de este trabajo. Egone Loebner no cree que sea justo atribuir a Round la invención del led, pero sí el descubrimiento de la electroluminiscencia. En cualquier caso, tanto Lósev como Round merecen un lugar en la historia de la tecnología del siglo xx.

Artículo original publicado en *Nature Photonics*, vol. 1, págs. 189-192, abril de 2007. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2007

PARA SABER MÁS

Luminous carborundum (silicon carbide) detector and detection with crystals. O. V. Lósev en *Telegrafiya i Telefoniya bez Provodov*, vol. 44, págs. 485-494, 1927.

Subhistories of the light emitting diode. E. E. Loebner en *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 23, págs. 675-699, 1976.

Ahead of the time. M. A. Novikov, cap. 1, págs. 7-31. N. I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod Publishing, 2006.

EN NUESTRO ARCHIVO

Diodos emisores de luz. M. George Craford, Nick Holonyak Jr. y F. A. Kish Jr. en *IyC*, abril de 2001.

Láseres verdes en miniatura. Shuji Nakamura y Michael Riordan en *IyC*, junio de 2009.

FUENTE: «A NOTE ON CARBORUNDUM», H. J. ROUND EN *ELECTRICAL WORLD*, VOL. 19, PÁGS. 309-310, 1907.

por Jan Eliasson

Jan Eliasson es Vicesecretario General de las Naciones Unidas.



La era de la hidrodiplomacia

La cooperación puede frenar el aumento de los conflictos por la escasez de agua

Estamos presenciando un auge de las crisis relacionadas con el agua. La cuenca oriental del mar de Aral se secó por completo en agosto por primera vez en 600 años. California sufre una sequía sin precedentes: va ya para tres años. Los cambios demográficos y unas actividades económicas no sostenibles están afectando a la cantidad y la calidad del agua disponible. La rápida urbanización crea una enorme presión sobre el consumo hídrico, con graves consecuencias para la salud humana y el medio. El agua se está convirtiendo en un recurso cada vez más escaso y caro, sobre todo para los pobres, los marginados y los vulnerables.

Se prevé que la demanda de agua habrá crecido más de un 40 por ciento para 2050. Y se calcula que, en 2025, 1800 millones de personas vivirán en países o regiones donde escasea el agua y dos tercios de la población mundial tendrán que pechar con un aporte de agua limpia insuficiente.

Si bien la movilización global suscitada por los Objetivos de Desarrollo del Milenio ha logrado que 2000 millones de personas dispongan de un suministro de agua mejor, 750 millones de personas siguen sin agua potable segura. Alrededor del 80 por ciento de las aguas residuales se arrojan sin depurar al mar, ríos y lagos. Casi 2 millones de niños de menos de cinco años mueren todos los años por falta de agua limpia y saneamientos decentes; 1000 millones de personas de 22 países siguen defecando al aire libre, y 2500 millones carecen de medios adecuados para la eliminación de las aguas residuales.

Por todo ello, en 2013 efectué, en nombre del Secretario General de las Naciones Unidas, un llamamiento para que se actuara sobre el saneamiento ambiental. Ha llegado la hora de romper el silencio y los tabúes que rodean a los retretes y la defecación al aire libre.

La falta de recursos hídricos también puede causar tensiones sociales, inestabilidad política e intensificación del flujo de refugiados. Por eso me gustaría ver que en el año que empieza se presta mayor atención a lo que llamo hidrodiplomacia.

El agua se utiliza incluso como arma de guerra. Fui testigo de ello durante el conflicto de Darfur. En una visita a una aldea del norte de la región sudanesa, en 2007, nos recibió un grupo de mujeres que coreaban «¡Agua, agua, agua!». La milicia enemiga había envenenado su pozo, decían, obligándolas a marcharse a los abarrotados campos para desplazados interiores. En Irak, el EIIL (Estado Islámico de Irak y el Levante) ha aprovechado el acceso al agua para expandir su control sobre el territorio y subyugar a la población. Ha cortado el agua a los pueblos que se resistían a su avance. Ha inundado extensiones considerables de tierra y ha desplazado así a miles de civiles. Y en meses recientes, ha dirigido sus operaciones hacia las presas iraquíes, en particular la de Mosul. Si reventase, correrían un grave peligro Mosul entera y medio millón de habitantes de Bagdad: una perspectiva escalofriante.



THINKSTOCK/VIJAYA-5712

Hemos visto también tensiones relacionadas con grandes obras hidroeléctricas, como la presa de Rogun, en Tayikistán, y la Gran Presa del Renacimiento Etíope. Los países vecinos han expresado ya su preocupación por el choque de intereses energéticos y agrícolas.

Con todo, no debemos perder de vista las oportunidades de cooperación. Históricamente, las tensiones por los recursos hídricos han conducido más a menudo a la colaboración que al conflicto. El Tratado de las Aguas del Indo, firmado en 1960 por India y Pakistán, ha sobrevivido a tres guerras y hoy sigue en vigor.

En otras palabras, el agua puede y debe impulsar la cooperación y la resolución de conflictos. Más del 90 por ciento de la población mundial vive en países que comparten cuencas de ríos y lagos, y 148 países comparten al menos una cuenca fluvial que atraviesa sus fronteras. Entre 1820 y 2007 se firmaron casi 450 acuerdos sobre aguas internacionales, entre ellos el Convenio del Agua, que se fraguó en 1992 bajo los auspicios de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas.

Además, el acceso compartido al agua puede abrirle hueco al diálogo interestatal sobre asuntos contenciosos que, de no ser atendidos, pueden poner en peligro la paz y la seguridad regional o internacional. Pensemos en la cooperación entre los países de la cuenca del lago Chad: Camerún, Chad, Níger y Nigeria fundaron la Comisión de la Cuenca en 1964 para gestionar equitativamente las menguantes aguas del lago. Se unieron a ellos después otros Estados concernidos, entre ellos Libia y la República Centroafricana. En 2014 se ampliaron las competencias de la Comisión para que cubriera problemas de seguridad regional como el terrorismo, el tráfico de armas y las insurgencias transfronterizas.

En 2015 y en años venideros, por medio del empeño diplomático, económico y científico, tendremos que centrarnos más en el agua como propiciadora de la cooperación que como engendradora de conflictos.

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 517, pág. 6, 2015. Traducido y adaptado con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2015.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,90€



Para efectuar tu pedido:

Teléfono: (34) 934 143 344

A través de nuestra Web:

www.investigacionyciencia.es

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorra un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO*
o 5 ejemplares de *TEMAS*
por el precio de 4 = 27,60€

SELECCIONES TEMAS

Ahorra más del 25 %

Ponemos a tu disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materias.

3 ejemplares = 15,00 €

1. **ASTRONOMÍA** — Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. **BIOLOGÍA** — Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. **COMPUTACION** — Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. **FÍSICA** — Núcleos atómicos y radiactividad, Fenómenos cuánticos, Fronteras de la física
5. **CIENCIAS DE LA TIERRA** — Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. **GRANDES CIENTÍFICOS** — Einstein, Newton, Darwin
7. **MEDICINA** — El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. **MEDIOAMBIENTE** — Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. **NEUROCIENCIAS** — Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
11. **LUZ Y TÉCNICA** — La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser
12. **ENERGÍA** — Energía y sostenibilidad, El futuro de la energía (I), El futuro de la energía (II)

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorra más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN

DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*
ANUAL (2 tomos) = 12,00 €
más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

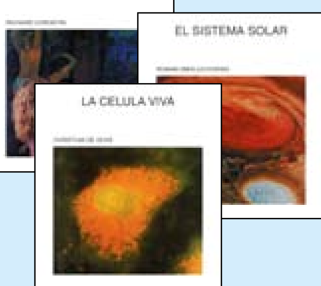
Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €





GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

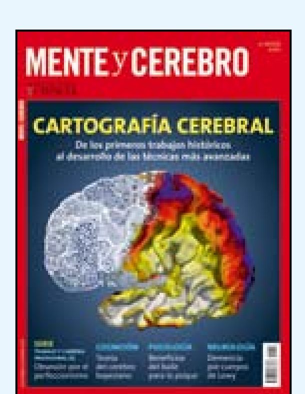
	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,90 €

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones *
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria *
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada
MyC 57: Psicobiología de la obesidad
MyC 58: El poder del bebé
MyC 59: Las huellas del estrés
MyC 60: Evolución del pensamiento
MyC 61: TDAH
MyC 62: El legado de Freud
MyC 63: ¿Qué determina la inteligencia?
MyC 64: Superstición
MyC 65: Competición por el cerebro
MyC 66: Estudiar mejor
MyC 67: Hombre y mujer
MyC 68: La hipnosis clínica
MyC 69: Cartografía cerebral
MyC 70: Pensamiento creativo

(*) Disponible solo en formato digital





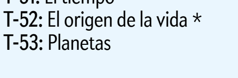
TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,90 €

T-1: Grandes matemáticos *
T-2: El mundo de los insectos *
T-3: Construcción de un ser vivo *
T-4: Máquinas de cómputo
T-5: El lenguaje humano *
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-10: Misterios de la física cuántica *
T-11: Biología del envejecimiento *
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-19: Los orígenes de la humanidad *
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-28: La consciencia *
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo *
T-52: El origen de la vida *
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico *
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad
T-70: Orígenes de la mente humana
T-71: Retos de la agricultura
T-72: Origen y evolución del universo
T-73: El sida
T-74: Taller y laboratorio
T-75: El futuro de la energía (I)
T-76: El futuro de la energía (II)
T-77: El universo matemágico de Martin Gardner
T-78: Inteligencia animal

(*) Disponible solo en formato digital









Precio por ejemplar: 6,90 €

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones
Cuadernos 4: Las neuronas
Cuadernos 5: Personalidad, desarrollo y conducta social
Cuadernos 6: El mundo de los sentidos
Cuadernos 7: El sueño
Cuadernos 8: Neuroglía
Cuadernos 9: La memoria





AZOTADAS POR EL VIENTO, las olas de un lago de Michigan dejaron congelado este faro durante una tormenta invernal.

CLIMA

EL COMPORTAMIENTO ANÓMALO DE LA CORRIENTE EN CHORRO

Los veranos e inviernos extremos de los últimos cuatro años tal vez se conviertan en algo habitual

Jeff Masters

EN SÍNTESIS

Durante los últimos cuatro años, se han sucedido eventos meteorológicos extremos cuando la corriente en chorro ha desarrollado ondulaciones muy pronunciadas.

Esos sucesos extremos se han generalizado y prolongado en el tiempo cuando la corriente en chorro ha mantenido su forma anómala durante largos períodos.

Algunos expertos creen que la causa principal del comportamiento anómalo de la corriente en chorro radica en el deshielo de la banquisa ártica. Otros investigadores discrepan.

En todo caso, una corriente en chorro más oscilante conllevará sequías, inundaciones, olas de calor y heladas más frecuentes en numerosas regiones del planeta.

THOMAS ZAKOWSKI, LANDOV

Jeff Masters es director de meteorología y cofundador de la compañía Weather Underground, creada en 1995. Especialista en eventos meteorológicos extremos, es autor de WunderBlog, uno de los blogs sobre meteorología más populares.



Entre noviembre de 2013 y enero de 2014, la corriente en chorro experimentó unas ondulaciones muy acusadas y persistentes en Norteamérica y Europa. Este flujo de aire, que circunvala el planeta de oeste a este a grandes altitudes, penetró más de lo habitual en EE.UU., lo que provocó que el vórtice polar (el ciclón de aire helado que gira en el Ártico) se desplazara hacia el sur y dejara los dos tercios orientales del país sumidos en intensas heladas. La capa de hielo de los Grandes Lagos alcanzó su segundo máximo de la historia y dos devastadoras tormentas de nieve y hielo paralizaron Atlanta durante días.

Mientras tanto, en California se instalaba un frente anticiclónico que llevó a la zona el invierno más cálido desde que hay registros. Aunque un invierno suave pueda parecer agradable, el episodio provocó la peor sequía que se recuerda desde finales del siglo xix, con pérdidas agrícolas valoradas en miles de millones de dólares.

Las contorsiones de la corriente en chorro afectaron también a Europa, donde una sucesión de intensas tormentas provocó daños por miles de millones de euros. En Inglaterra y Gales tuvo lugar el invierno más húmedo desde, al menos, 1766. Buena parte del resto de Europa experimentó un calor excepcional. Noruega sufrió en enero del año pasado incendios forestales sin precedentes y los organizadores de los Juegos Olímpicos de Sochi, en Rusia, hubieron de hacer frente a unas pistas de esquí que se fundían. En mayo, casi un tercio de Bosnia quedó inundada a causa de lluvias torrenciales.

En condiciones normales, la corriente en chorro se asemeja a un cinturón de aire que sopla en las latitudes medias. Tal y como se aprecia en los partes meteorológicos, suele presentar ligeras ondulaciones hacia el norte y el sur, las cuales le confieren un aspecto parecido al de la señal sinusoidal de un osciloscopio. Tales curvas reciben el nombre de ondas planetarias, o de Rossby. En ellas, una serie de ondulaciones menores, llamadas «ondas cortas», suelen tardar entre tres y cinco días en atravesar Estados Unidos. Gran parte de la meteorología cotidiana del país responde a ellas.

Sin embargo, durante el invierno de 2013-2014, las ondas de Rossby se amplificaron y trazaron curvas muy pronunciadas, más similares a las de un electrocardiograma errático. Tras adoptar dicha configuración, la corriente cruzó el planeta a una velocidad mucho menor de lo habitual; incluso se detuvo en algunas zonas durante semanas, lo que dio lugar a largos períodos de tiempo anómalo. En mayo del año pasado, un estudio dirigido por Shih-Yu (Simon) Wang, de la Universidad estatal de Utah, reveló que aquellas deformaciones de la corriente sobre Norteamérica habían sido las más acusadas desde que hay registros.

¿Fue aquello una excepción? Quizá no, ya que el fenómeno parece repetirse cada vez más a menudo. En 2010, más de 55.000 personas murieron en Rusia como consecuencia de la ola de calor más sofocante de su historia escrita. Al mismo tiempo, las lluvias torrenciales inundaban Pakistán y causaban el desastre natural de mayores pérdidas económicas registrado en el país. En 2011, Oklahoma sufrió el verano más caluroso que ningún estado de EE.UU. haya experimentado jamás. Y, en 2012, EE.UU. vivía su peor sequía desde los años treinta.

Según un artículo publicado en abril de 2013 por un grupo dirigido por Vladimir Petoukhov, del Instituto de Investigación sobre Impacto Climático de Potsdam, las ondulaciones de la corriente en chorro durante tales eventos compartieron una característica: las ondas, que normalmente se desplazan hacia el este, se detuvieron y se amplificaron de manera considerable. En ocasiones, los meandros permanecieron estancados durante días o incluso meses. Los expertos también demostraron que esa configuración extrema dobló su frecuencia durante los veranos de 2001 a 2012 en comparación con los estíos de los 22 años anteriores.

Como cantaba Bob Dylan, «no hace falta un hombre del tiempo para saber hacia dónde sopla el viento». Algo ocurre con la corriente en chorro, y no resulta muy difícil aventurar una posible causa. El clima del planeta ha cambiado de manera drástica en los últimos 150 años. La concentración atmosférica de dióxido de carbono ha aumentado en más del 40 por ciento, debido principalmente a la quema de combustibles fósiles. La extensión de la banquisa ártica durante el verano se ha reducido en casi un 50 por ciento desde 1900, lo que ha afectado al flujo de calor en la atmósfera y el océano. La cantidad de energía solar reflejada por la superficie terrestre ha variado de forma notable, ya que hemos modificado más de la mitad del paisaje del planeta con cultivos, pastizales y ciudades. Centrales eléctricas, vehículos, edificios y fábricas escupen descomunales nubes de hollín y contaminación que reflejan y absorben la luz solar. Sobre la Antártida, un enorme agujero de ozono perturba la circulación de los vientos en las capas altas de la atmósfera.

Y, si el ser humano ha alterado el clima, las leyes de la física dictan que esos cambios modificarán las principales pautas meteorológicas. De hecho, según la posibilidad que Wang y sus colaboradores juzgaban más probable, la corriente en chorro no

NUBES ALTAS SOBRE EL ESTE DE CANADÁ, **agrupadas a lo largo de la corriente en chorro. En esta imagen, tomada desde la lanzadera espacial, el norte se orienta hacia el margen inferior, donde se aprecia la isla del Cabo Bretón (*centro*). La velocidad de la corriente puede alcanzar los 300 kilómetros por hora.**

habría experimentado un comportamiento tan extraño de no haber sido por la influencia del cambio climático antropogénico.

El peligro reside en que el sistema climático no es lineal. Un ligero calentamiento puede disparar un cambio súbito hacia un nuevo régimen meteorológico muy distinto del anterior. Los climatólogos mantienen un intenso debate sobre si el clima en general, y la corriente en chorro en particular, han cruzado ya el umbral hacia una nueva fase a largo plazo. También discuten sobre una polémica teoría, defendida por los expertos de Potsdam y otros investigadores, según la cual las alteraciones de la corriente en chorro obedecerían en buena medida a los eventos acontecidos en la región del planeta donde el calentamiento procede con mayor rapidez: el Ártico.

Si la corriente en chorro está entrando en un nuevo régimen, el cambio no augura nada bueno para nuestras sociedades. En un artículo publicado en agosto en *Nature Climate Change*, James Screen, de la Universidad de Exeter, y Ian Simmonds, de la de Melbourne, se aventuraron a identificar las posibles consecuencias. Según ellos, si las ondulaciones de la corriente en chorro se amplifican en respuesta a un cambio climático antropogénico, tenderán a aumentar las olas de calor en Norteamérica occidental y Asia central; las olas de frío en Norteamérica oriental; las sequías en el centro de Norteamérica, Europa y Asia central; y las precipitaciones extremas en Asia occidental.

Esa nueva normalidad traería un mayor número de sequías devastadoras al Medio Oeste estadounidense. En el este del país habría más inviernos acompañados de grandes tormentas de nieve, como el *snowmageddon* que en 2010 paralizó Washington D.C. Y, en todo el mundo, el precio de los alimentos aumentaría como consecuencia de unas sequías intensas y prolongadas en el centro de Norteamérica, Europa y Asia central.



FACTORES NATURALES DE VARIABILIDAD

El cambio climático podría modificar la corriente en chorro de manera indirecta, ya que afecta a las fuerzas atmosféricas que, en última instancia, condicionan su forma. La corriente en chorro consta de un flujo continuo de aire que circunda el planeta en ambos hemisferios a una altitud de entre nueve y catorce kilómetros. Actúa como una guía que dicta el camino de las bajas presiones responsables de las precipitaciones. En general, presenta dos ramas: un chorro polar, que separa el aire frío próximo a los polos del aire caliente cercano al ecuador, y uno subtropical, menos vigoroso, que sopla en latitudes próximas al ecuador. En lo sucesivo, cuando hablemos de la corriente en chorro nos referiremos al chorro polar.

La latitud de la corriente exhibe una ligera variación estacional: suele situarse sobre la zona central de EE.UU. durante el invierno y cerca de la frontera entre EE.UU. y Canadá en verano. El flujo, sin embargo, es caótico, por lo que siempre desarrolla ondas de Rossby. En el hemisferio septentrional, cuando la corriente gira hacia el norte en forma de cresta anticiclónica, una masa de aire cálido sopla desde el sur. Si la corriente vira hacia el sur como frente de bajas presiones, trae consigo una masa de aire frío.

La existencia de la corriente en chorro se debe a la presencia de tres grandes células de aire en circulación que, en cada hemisferio, giran engranadas entre sí. Si bien estas células dan

Continúa en la página 58

Corriente en chorro y tiempo extremo

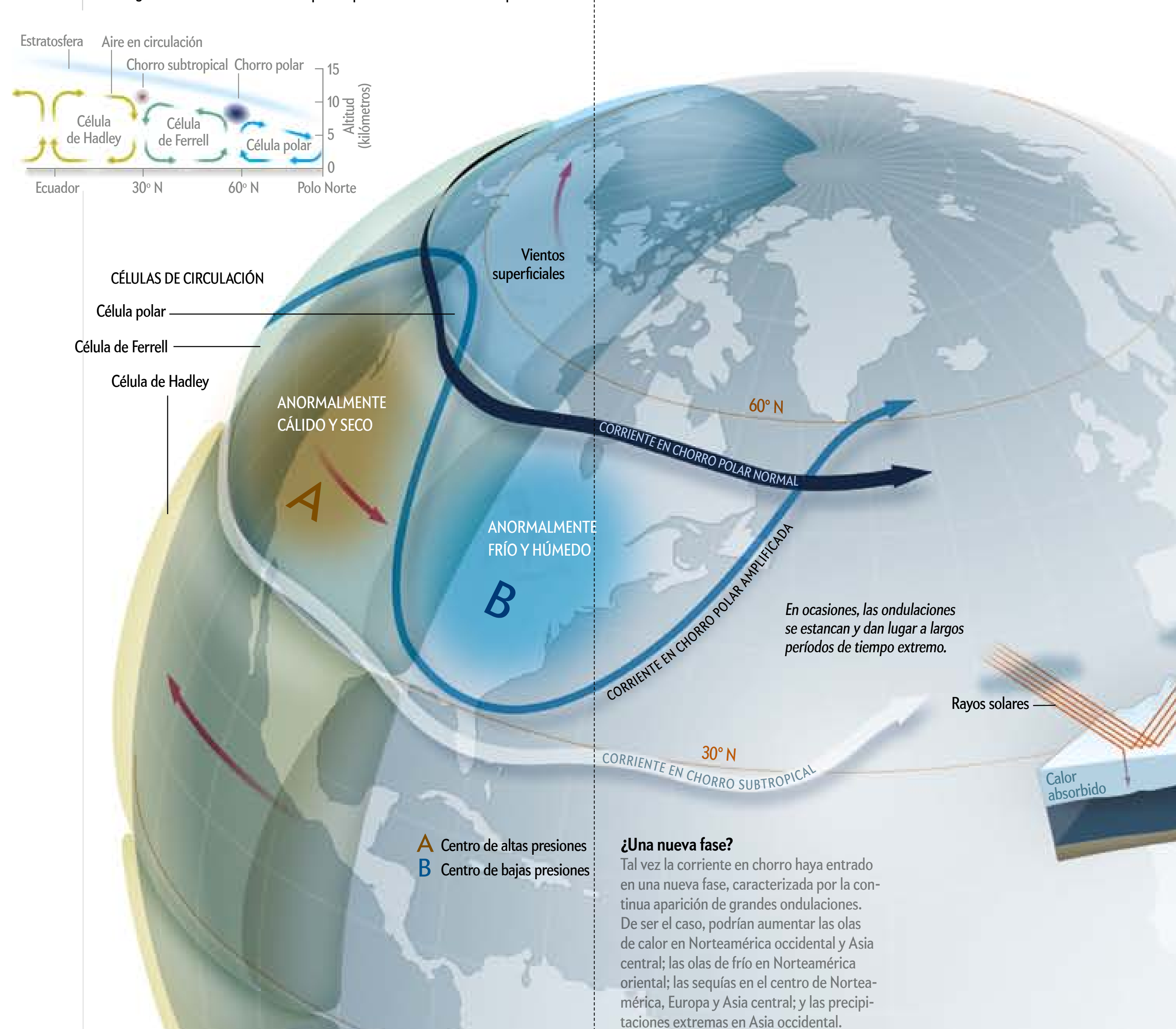
En cada hemisferio terrestre soplan dos corrientes en chorro a elevada altitud. Cuando las ondulaciones de la corriente polar aumentan (*página izquierda*), un aire anormalmente cálido o frío puede invadir las áreas continentales. Esos meandros pueden quedar estancados durante semanas y causar sequías, inundaciones, olas de calor e intensas heladas. Se han propuesto dos teorías para explicar las pronunciadas ondulaciones observadas durante los últimos años (*página derecha*): una las achaca a la variabilidad natural (1); la otra, al cambio climático (2).

Formación de las corrientes en chorro

Debido a que el ecuador recibe más luz solar que los polos, el aire en esas latitudes asciende, alcanza la estratosfera y se desplaza hacia los polos. La rotación de la Tierra desvía el flujo y origina, en cada hemisferio, tres células de circulación que giran engranadas. Las corrientes en chorro se forman a lo largo de los límites entre células para equilibrar las diferencias de presión.

Ondulaciones polares, olas de calor y heladas

Cuando las suaves ondulaciones de la corriente en chorro se amplifican (*flecha azul ondulada*), las masas de aire cálido pueden adentrarse hacia el norte más de lo habitual; las de aire frío, como el vórtice polar, lo hacen hacia el sur. En condiciones normales, las ondulaciones tardan entre tres y cinco días en cruzar una extensión como Norteamérica.



¿Una nueva fase?

Tal vez la corriente en chorro haya entrado en una nueva fase, caracterizada por la continua aparición de grandes ondulaciones. De ser el caso, podrían aumentar las olas de calor en Norteamérica occidental y Asia central; las olas de frío en Norteamérica oriental; las sequías en el centro de Norteamérica, Europa y Asia central; y las precipitaciones extremas en Asia occidental.

Origen de las ondulaciones: dos posibilidades

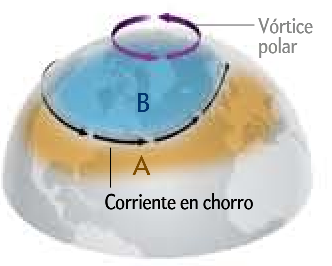
1 Oscilaciones atmosféricas

Algunos fenómenos atmosféricos naturales pueden alterar la trayectoria de la corriente en chorro. Los principales sospechosos son El Niño y la Oscilación Ártica.



El Niño (Oscilación del Sur)
Este ciclo de la presión atmosférica tropical consta de dos fases: El Niño, que transfiere aguas cálidas hacia el este del océano Pacífico y hace que la corriente en chorro penetre hacia el sur, y La Niña, que provoca el efecto opuesto. Las grandes diferencias observadas recientemente en ambas fases, ligadas a una corriente en chorro más sinuosa, podrían ser, o bien naturales, o bien una respuesta al cambio climático.

La fase positiva se halla asociada a una mayor diferencia de presión y a un intenso vórtice polar. Ello favorece una trayectoria más rectilínea de la corriente en chorro y retiene el aire frío en el norte.



La fase negativa se asocia a una diferencia de presión menor. Por un lado, eso debilita la corriente en chorro y facilita las ondulaciones; por otro, atenúa el vórtice polar, lo que provoca la migración de aire frío hacia el sur.

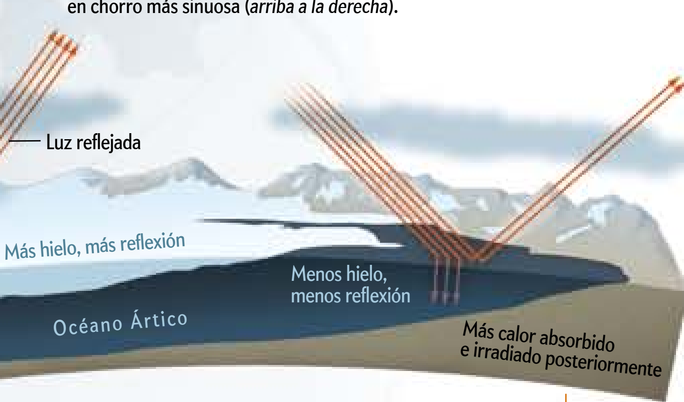


Oscilación Ártica
Este fenómeno responde a las variaciones semanales de la presión a nivel del mar entre el Ártico y las latitudes medias. Una serie de factores en parte desconocidos causan la alternancia entre fases positivas y negativas.

A Centro de altas presiones
B Centro de bajas presiones

2 Amplificación ártica

El Ártico se está calentando entre dos y tres veces más rápido que las latitudes medias. Una de las razones principales radica en el deshielo de la banquisa (*abajo*): el agua líquida absorbe una mayor cantidad de energía solar en verano y la vuelve a radiar en invierno; ello provoca que la temperatura del aire en la célula polar aumente más rápido que en la de Ferrell (*derecha*). Una menor diferencia entre las células conlleva una Oscilación Ártica negativa y una corriente en chorro más sinuosa (*arriba a la derecha*).



1979
Vientos otoñales más rápidos

2012
Unos 3 grados Celsius más caliente
En torno a 1 grado Celsius más caliente
Célula polar
Vientos otoñales más lentos
Célula de Ferrell
Célula de Hadley

Menos hielo, vientos más débiles
Entre 1979 y 2012, la extensión mínima de la banquisa ártica se redujo un 40 por ciento; en el mismo período, los vientos que soplan sobre Norteamérica en otoño disminuyeron su velocidad un 10 por ciento (*gráficos*). Un viento más lento se asocia con la presencia de curvas más pronunciadas en la corriente en chorro.

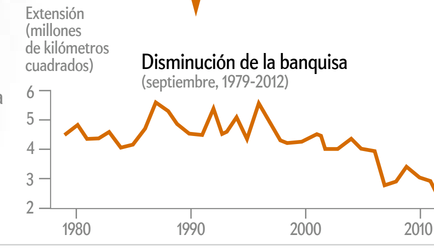




ILUSTRACIÓN DE JUAN VELASCO, 5W INFOGRAPHICS; INVESTIGACIÓN DE AMANDA HOBBS; FUENTE: CENTROS NACIONALES PARA LA PREDICCIÓN MEDIOAMBIENTAL Y LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DEL SISTEMA TERRESTRE (*gráficos inferiores, derecha; datos de viento*), CENTRO NACIONAL DE DATOS SOBRE NIEVE Y HIELO (*gráficos inferiores, izquierda; datos de banquisa*); RECOPILADO POR JENNIFER FRANCIS (*gráficos inferiores, derecha*)

Viene de la página 55

forma a la corriente en chorro, otras fuerzas atmosféricas pueden también modelar su curso. En realidad, la influencia de la atmósfera depende de factores como la energía que llega del Sol, la forma y la posición de los continentes y las corrientes oceánicas, la presencia de cadenas montañosas o la concentración atmosférica de polvo reflector y gases de efecto invernadero. Del mismo modo que una guitarra resuena de un modo u otro al puntear varias cuerdas, los cambios en los factores citados provocan que la atmósfera desarrolle sus propias resonancias naturales, llamadas patrones de teleconexión. Estos pueden modificar la forma de la corriente en chorro, lo que dificulta saber si su reciente comportamiento constituye o no un signo de cambio permanente.

En el hemisferio norte, los dos patrones de teleconexión más importantes son El Niño (u Oscilación del Sur) y la Oscilación Ártica. El Niño consta de un ciclo de entre tres y ocho años que afecta a las presiones atmosféricas tropicales. Cuando se produce, se transfieren aguas oceánicas más cálidas de lo habitual hacia el este del Pacífico. Durante la fase contraria, La Niña, se desplazan aguas más frías. Con El Niño, la corriente en chorro suele desviarse hacia el sur en el Pacífico oriental; con La Niña, el flujo de aire en esa zona se desvía hacia el norte.

Por su parte, la Oscilación Ártica obedece a las fluctuaciones semanales de la presión a nivel del mar entre el Ártico y las latitudes medias. Si la diferencia de presión es baja, los vientos de la corriente en chorro tienden a debilitarse, lo que facilita que se formen pronunciados meandros. En invierno, una pequeña diferencia de presión suele provocar que una masa de aire frío se desplace hacia el sur sobre el este de EE.UU., Europa occidental y Asia oriental.

LA FUSIÓN DEL ÁRTICO

Los patrones atmosféricos de teleconexión se encuentran relacionados entre sí. Pueden anularse o potenciarse mutuamente, por lo que existe la posibilidad de que un cambio en la dinámica general de la atmósfera altere sus pautas meteorológicas principales y provoque anomalías en la corriente en chorro. Consideré tal posibilidad en 2011, cuando una corriente en chorro muy acusada persistió durante un episodio de La Niña de intensidad entre baja y moderada durante una parte del año, algo inusitado. Por entonces no se había publicado ninguna teoría que diese cuenta de una situación así.

En diciembre de ese año, durante el congreso que la Unión Geofísica Americana celebraba en San Francisco —el mayor encuentro internacional de climatólogos—, Jeniffer Francis, de la Universidad Rutgers, presentó nuevos y sorprendentes resultados sobre aquel evento. Para la experta, la pregunta no era si la pérdida de hielo oceánico en el Ártico estaba repercutiendo en la circulación atmosférica a gran escala, sino cómo podría *no* hacerlo. Francis recordó que el Ártico se estaba calentando entre dos y tres veces más rápido que el resto del hemisferio norte, un fenómeno conocido como «amplificación ártica», y señaló que eso podía modificar de manera considerable la corriente en chorro en ese hemisferio.

Se trata de una hipótesis más que razonable. Una de las principales causas de la amplificación ártica en otoño e invierno radica en el deshielo de la banquisa. El océano Ártico ha perdido una asombrosa cantidad de hielo en los últimos años, tanto por fusión como debido a vientos desfavorables. Comparado con la media entre 1979 y el año 2000, en septiembre de 2012 había desaparecido el 49 por ciento de la cubierta de hielo: un área equivalente al 43 por ciento de la superficie de Estados Unidos. El deshielo deja al descubierto el agua líquida, que, al ser más oscura, absorbe una mayor cantidad de radiación solar. El consecuente calentamiento del océano y la atmósfera implica a su vez más deshielo, y así sucesivamente.

En otoño e invierno, el agua expuesta libera el calor almacenado, lo que perturba de manera considerable la dinámica de la atmósfera ártica durante varios meses. La amplificación ártica también se ha producido en verano, a medida que disminuía la capa de nieve en la zona. Debido al calentamiento global, la primavera se ha ido adelantando a razón de unos tres días por década. Eso ha provocado que la nieve se derrita y que, cada vez con mayor antelación, el suelo oscuro quede expuesto a la radiación solar, absorba calor y se seque. Todo ello ha llevado un calentamiento prematuro también a las zonas continentales.

Junto con otros factores, la amplificación ártica ha reducido de forma notable la diferencia de temperatura entre el polo y las latitudes medias del hemisferio norte. Si el gradiente térmico disminuye, se transfiere menos energía entre dos de las grandes células de circulación atmosférica, lo que a su vez debilita los vientos de la corriente en chorro. Francis y Stephen Vavrus, de la Universidad de Wisconsin-Madison, han documentado que, desde 1979, los vientos que en otoño soplan a altitudes elevadas sobre Norteamérica y el Atlántico Norte han disminuido de intensidad en torno a un 10 por ciento, un fenómeno que casa bien con la disminución de la diferencia de temperaturas entre el polo y las latitudes medias.

Una ralentización del flujo permite que la corriente en chorro adopte un curso más serpenteante. Francis señala que, desde el año 2000, los frentes de altas y bajas presiones asociados al chorro polar han aumentado de forma notable su amplitud tanto en verano como en invierno. La presencia de meandros más pronunciados suele conllevar que, a un lado de la corriente en chorro, una masa de aire cálido se desplace hacia el polo más de lo habitual, y que, al otro, el aire frío penetre hacia el sur. Eso fue lo que ocurrió durante la ola de frío que en enero de 2014 asoló el este de EE.UU. —la tan cacareada invasión del vórtice polar— y la simultánea sequía en California, donde las temperaturas alcanzaron cotas sin precedentes. Las matemáticas del fenómeno predicen, además, que las ondas cortas de una corriente en chorro menos vigorosa se desplazarán hacia el este con mayor lentitud, lo que prolongará los anómalos efectos de las ondulaciones. Tales frentes podrían llegar a detenerse por completo y originar «bloques» que paralizasen el movimiento ondulatorio, del mismo modo que, en un río, los remolinos pueden generar puntos muertos donde el flujo se detiene.

DISPUTA CIENTÍFICA

La posible relación entre la amplificación ártica y el comportamiento anómalo de la corriente en chorro ha desatado un vivo debate entre los científicos. En septiembre de 2013, en un encuentro convocado por el Consejo Nacional para la Investigación de EE.UU. y celebrado en la Universidad de Maryland, más de 50 climatólogos mantuvieron un acalorado debate sobre la cuestión. Si bien numerosos expertos coinciden en que la corriente en chorro parece estar cambiando, muchos de ellos ponen en duda que el período de tiempo en que se ha intensificado la amplificación ártica (unos 15 años, relativamente corto) baste para establecer un vínculo entre ambos fenómenos.

Otros climatólogos cuestionan la hipótesis basada en argumentos energéticos, dado que para modificar el descomunal

flujo de la corriente en chorro, se requiere una gran cantidad de energía. Kevin E. Trenberth, del Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas, calcula que la cantidad de energía inyectada en la región polar a causa de la amplificación ártica es un orden de magnitud menor que la transferida durante los cambios naturales provocados por El Niño. El pasado mes de agosto, Trenberth publicó un artículo en *Nature Climate Change* en el que, junto con otros investigadores, demostraba que los llamativos meandros de la corriente en chorro también podían deberse a causas naturales. En concreto, a los cambios energéticos producidos en el Pacífico tropical durante los últimos años como consecuencia de la Oscilación Decenal del Pacífico, otro patrón de teleconexión. Con todo, el artículo concluía que los cambios observados en la oscilación durante los últimos diez años podrían implicar que, tal vez, la variabilidad natural misma podría estar viéndose afectada por el cambio climático.

Trenberth fue uno de los cinco destacados climatólogos que, en febrero del año pasado, publicaron en *Science* una crítica a la investigación de Francis. En su artículo reconocían que la hipótesis que atribuía las amplias ondulaciones de la corriente en chorro al calentamiento ártico merecía «un juicio justo»; pero que, desde su punto de vista, los argumentos teóricos en los que se apoyaba carecían de peso.

Otros expertos cuestionan incluso que la amplitud de las ondulaciones de la corriente esté aumentando. En un artículo publicado en 2013, Screen y Simmonds evaluaron dichas ondulaciones a partir de una definición distinta de la empleada por Francis y hallaron pocos cambios estadísticamente significativos (aunque sí observaron una ligera tendencia general hacia ondulaciones más acusadas). En todo caso, las críticas no han servido de mucho a la hora de explicar el comportamiento extremo de la corriente en chorro. Una hipótesis publicada en agosto en la revista *PNAS* por Dim Coumou, de Potsdam, y su equipo señalaba que, por sí misma, la menor diferencia de temperaturas entre las latitudes medias y los polos podría bastar para causar tanto la amplificación de la corriente en chorro como su estancamiento, al menos en verano.

DEMASIADO TARDE PARA ESPERAR

Por más que los expertos no se pongan de acuerdo sobre una posible explicación, los datos meteorológicos resultan esclarecedores. En 2011 y 2012 se desencadenaron eventos similares o incluso más catastróficos que algunos de los desastres más simbólicos y destructivos de la historia de EE.UU., como el «supertornado» de 1974, la ola de calor y sequía del *Dust Bowl* («Cuenco de Polvo») de 1936 o la gran inundación del Mississippi de 1927. El comportamiento reciente de la corriente en chorro tal vez nos esté indicando que hemos pasado el umbral hacia un clima nuevo y más amenazador.

A medida que el planeta se caliente, se producirán sequías y olas de calor más intensas allí donde ondulen las crestas anticiclónicas de la corriente en chorro. Una mayor evaporación de los océanos introducirá más humedad en la atmósfera, lo que desencadenará tormentas más duras y chubascos más intensos donde la corriente vire hacia el ecuador en forma de frentes de bajas presiones. Si la corriente continúa mostrando ondas más amplias y lentas, las condiciones meteorológicas adversas se recrudecerán y perdurarán durante más tiempo, lo que aumentará su potencial destructor. Si las teorías de Francis y sus colaboradores son correctas, no podremos recuperar nuestro antiguo clima sin generar más hielo marino en el Ártico. Pero, dado que la concentración atmosférica de CO_2 continúa aumentando en torno a un 0,5 por ciento al año, nadie espera una regeneración de la banquisa a largo plazo.

La sequía representa la mayor amenaza de todas, ya que afecta a nuestros dos recursos principales: el agua y la comida. Si una corriente en chorro con amplias ondulaciones y excéntricos frentes de altas presiones se estancara durante todo un verano sobre los cultivos de cereal de Rusia y EE.UU., esas regiones no recibirían las precipitaciones de las que dependen. La sequía resultante causaría un aumento notable en el precio de los alimentos, una hambruna generalizada y disturbios violentos. Durante la gran sequía y la ola de calor que azotó Rusia en 2010, se instaló en el país un frente anticiclónico masivo e impenetrable. El fenómeno provocó que los sistemas borrascosos que, en condiciones normales, traen la lluvia a los cultivos rusos se desplazaran hacia Pakistán, donde causaron inundaciones catastróficas. Aquella sequía y ola de calor supusieron el desastre natural más mortífero y costoso de la historia de Rusia. Obligaron al país a recortar las exportaciones de trigo, lo que elevó el precio global de los cereales e impulsó las revueltas de la Primavera Árabe de 2011.

Sin duda, las medidas no pueden esperar a que los científicos comprendan por completo cómo y por qué está cambiando el clima. Según el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), debemos actuar globalmente con rapidez y decisión si deseamos mantener el calentamiento del planeta por debajo de los dos grados Celsius. El uso de fuentes de energía con bajas o nulas emisiones de carbono, como la solar, la eólica y la nuclear, así como la aplicación de técnicas de captura y almacenamiento de carbono, deberían al menos triplicarse para 2050. Por su parte, las emisiones de gases de efecto invernadero deben disminuir entre un 40 y 70 por ciento con respecto a las concentraciones de 2010. Los expertos del IPCC sostienen que la transición podría resultar sorprendentemente asequible, con una merma del crecimiento económico mundial del 0,06 por ciento al año. Pero, si esperamos hasta 2030, las medidas necesarias acarrearán costes mucho mayores y, tal vez, no nos aseguren permanecer por debajo del umbral.

Según destacados climatólogos, ese también será el año en que la banquisa ártica prácticamente desaparecerá durante el verano. Si las anomalías de la corriente en chorro realmente obedecen a los cambios en el Ártico, el deshielo del 50 por ciento restante provocará un comportamiento aún más extraño. Y, si el Ártico no influye, tampoco sería menos preocupante, ya que implicaría que los cambios en la corriente en chorro obedecen a un mecanismo desconocido cuya respuesta ante un cambio climático progresivo ignoramos. Así las cosas, mi previsión para los próximos años es: esperen lo nunca visto.

PARA SABER MÁS

Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. Jennifer A. Francis1 y Stephen J. Vavrus en *Geophysical Research Letters*, vol. 39, n.º 6, marzo de 2012.

Global warming and winter weather. John M. Wallace et al. en *Science*, vol. 343, n.º 6172, febrero de 2014.

Linkages between arctic warming and mid-latitude weather patterns: Summary of a workshop. Katie Thomas et al. National Academies Press, 2014.

WunderBlog. Blog del autor: **www.wunderground.com/blog/JeffMasters/show.html**

EN NUESTRO ARCHIVO

Inviernos extremos. Charles H. Greene en *IyC*, febrero de 2013.

Terence Tao es catedrático de matemáticas en la Universidad de California en Los Ángeles. Entre sus muchos logros se cuenta la demostración de que la secuencia de números primos incluye progresiones aritméticas de longitud arbitraria. En 2006 fue galardonado con la medalla Fields por sus contribuciones a los campos de las ecuaciones en derivadas parciales, la combinatoria, el análisis armónico y la teoría de números.



MATEMÁTICAS

LEYES UNIVERSALES

Varios sistemas complejos muy dispares presentan el mismo comportamiento a gran escala. Aunque el fenómeno se ha observado en todo tipo de contextos, su fundamentación matemática sigue planteando numerosas preguntas

Terence Tao

La matemática moderna nos proporciona una poderosa herramienta para modelizar las situaciones del mundo real, ya se trate de fenómenos naturales, como el movimiento de los planetas o las propiedades fisicoquímicas de un material, o artificiales, como el mercado de valores o las preferencias de voto de un electorado.

Al menos en principio, los modelos matemáticos pueden aplicarse al estudio de sistemas extremadamente complejos, integrados por un gran número de componentes en interacción mutua. En la práctica, sin embargo, solo sabemos resolver con precisión los casos más simples, como aquellos en los que interaccionan únicamente dos o tres agentes. Así, mientras que la derivación matemática de las líneas espectrales del átomo de hidrógeno (en el que un solo electrón orbita en torno al núcleo) puede enseñarse a estudiantes de carrera, las del átomo de sodio (con once electrones) quedan fuera del alcance de los ordenadores más potentes. El problema de los tres cuerpos, consistente en predecir el movimiento de tres masas ligadas por la ley de la gravitación universal, goza de fama por haber sido el único que dio dolores de cabeza a Newton. Al contrario de lo que sucede cuando solo consideramos dos masas, se cree que la solución del problema de los tres cuerpos no puede expresarse de manera simple, y que este solo puede resolverse de forma aproximada mediante algoritmos numéricos. Esa incapacidad para llevar a término los cálculos cuando interaccionan un gran número de componentes ha sido apodada «maldición de las dimensiones».

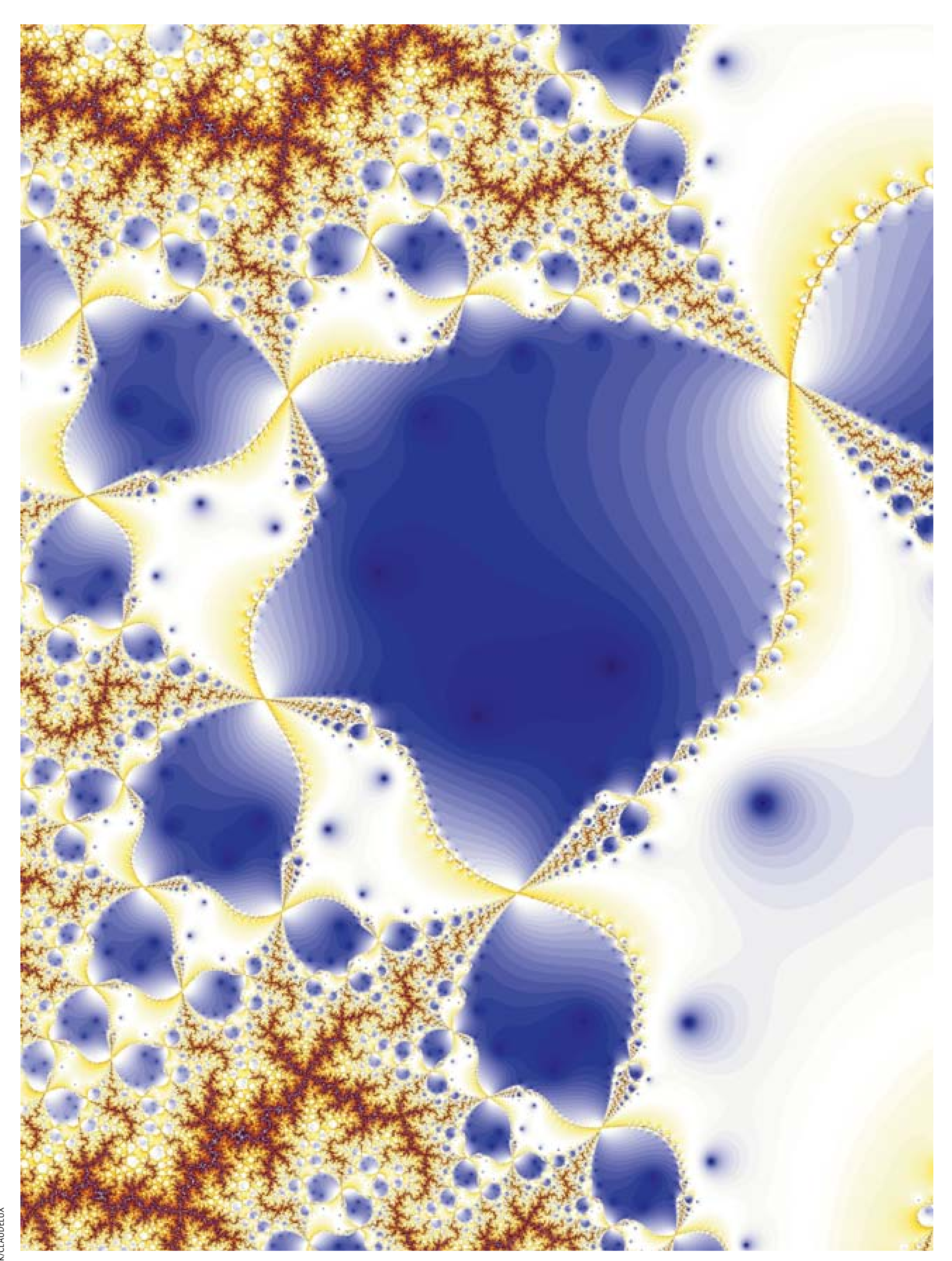
Sin embargo, cuando el número de componentes se torna lo suficientemente elevado, ocurre algo fascinante: por alguna razón, las propiedades colectivas del sistema vuelven a ser predecibles, quedando gobernadas por leyes simples de la naturaleza. Más notable aún, las leyes macroscópicas que rigen el sistema completo resultan en gran medida independientes de las que describen las interacciones microscópicas entre sus componentes. Podemos reemplazar los constituyentes microscópicos por otros muy distintos y, aun así, obtener el mismo comportamiento

EN SÍNTESIS

En ocasiones, las leyes que gobiernan el comportamiento colectivo de un sistema resultan prácticamente independientes de su estructura microscópica. Cuando eso ocurre, se dice que la ley macroscópica es universal.

La universalidad se ha observado en ámbitos físicos y matemáticos tan diversos como la estadística, la física de las transiciones de fase, la física nuclear, los modelos de matrices aleatorias y la teoría de números.

En algunos casos, como la ley de los grandes números o el teorema del límite central, el fenómeno se entiende bien. En otros muchos, sin embargo, la causa matemática que subyace a la universalidad aún se desconoce.



THINKSTOCK/CLAUDELUX

FORMAS RECURRENTES: Las geometrías fractales exhiben un patrón que se repite a sí mismo a todas las escalas. A menudo, la ausencia de una escala de distancias característica marca la aparición de una ley universal.

a gran escala. Cuando eso sucede, decimos que la ley macroscópica es *universal.*

La universalidad se ha observado matemática y empíricamente en contextos muy diversos, algunos de los cuales analizaremos a continuación. En ciertos casos, el fenómeno se entiende bien. En otros muchos, sin embargo, la causa última de la universalidad sigue siendo un misterio. La cuestión de por qué las leyes universales emergen tan a menudo en los sistemas complejos constituye un área muy activa de la investigación matemática actual. Y, aunque aún estamos lejos de hallar una respuesta satisfactoria, durante los últimos años se han logrado algunos avances alentadores.

LA UNIVERSALIDAD EN ESTADÍSTICA

Las elecciones presidenciales estadounidenses de noviembre de 2008 fueron terriblemente complejas. Más de cien millones de personas de cincuenta estados estaban llamadas a votar. Cada una de ellas se había visto influida por todo tipo de factores: la retórica de los candidatos durante la campaña, los medios de comunicación, rumores, impresiones personales o discusiones con amigos y familiares. Además, había millones de votantes indecisos; su actuación era impredecible y, en algunos casos, tal vez incluso aleatoria. La misma incertidumbre persistía entre los distintos estados: aunque en algunos se perfilaba un claro ganador, en al menos una docena de ellos el resultado podía decantarse en cualquier dirección.

Parecería imposible predecir el desenlace de una situación así. Por supuesto que se hicieron encuestas —cientos de ellas—, pero en cada una se entrevistó solo a unos pocos centenares o millares de potenciales votantes, una fracción insignificante del total. A menudo, los datos fluctuaban y ofrecían predicciones contradictorias. No todos los sondeos merecían la misma confianza y no había dos organizaciones que hubiesen empleado exactamente los mismos métodos.

Sin embargo, antes de que terminase la noche electoral, el resultado pudo pronosticarse con bastante precisión. Especialmente llamativas fueron las predicciones del analista y estadístico Nate Silver: a partir de un estudio ponderado de todas las encuestas disponibles, Silver acertó el desenlace en 49 de los 50 estados, así como el de las 35 elecciones al Senado que también se celebraban aquel día. (La única excepción fue Indiana, estado en el que Silver pronosticó que ganaría John McCain, pero donde finalmente ganó Barack Obama por un ajustado 0,9 por ciento.)

Esa precisión puede explicarse a partir de un resultado matemático conocido como ley de los grandes números. En el caso que nos ocupa, dicha ley garantiza que, siempre que en una encuesta participe un número suficientemente elevado de personas elegidas al azar, las predicciones del sondeo tenderán a converger a los resultados reales, con un margen de error que dependerá del número de entrevistados. Por ejemplo, en una encuesta en la que participen mil personas, el margen de error rondará el 3 por ciento.

La ley de los grandes números es universal. Con independencia de que participen cien mil votantes o cien millones, el margen de error seguirá aproximándose al 3 por ciento. No importa que el sondeo se haya llevado a cabo en un estado que otorgó a McCain el 55 por ciento de los votos o en uno en el que Obama obtuvo el 60 por ciento de las papeletas. Tampoco que se trate de un estado compuesto por una masa homogénea de urbanitas adinerados de raza blanca o, por el contrario, de uno con un gran número de etnias y clases sociales. Al final, todos esos detalles se tornarán irrelevantes y el margen de error seguirá rondando el 3 por ciento. El único factor verdaderamente significativo es el tamaño de la muestra: cuanto mayor sea esta, menor será el margen de error. La inmensa complejidad de cientos de millones de votantes queda así reducida a unos pocos números.

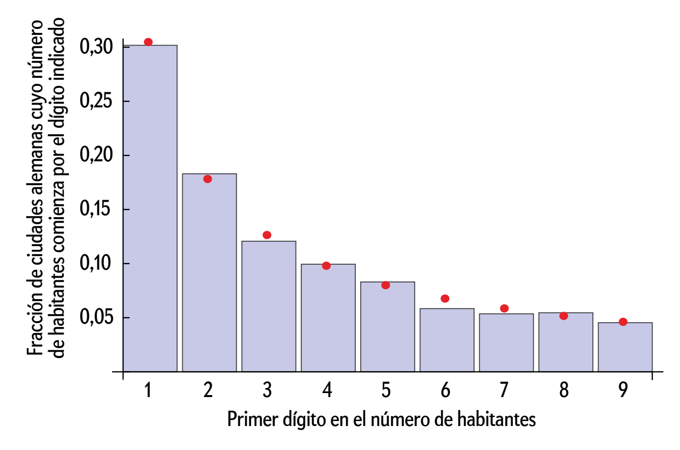
La ley de los grandes números no constituye ni mucho menos el único ejemplo de ley universal. Hace décadas que esta clase de comportamiento se viene observando en todo tipo de sistemas complejos, con independencia de cuáles sean sus constituyentes elementales y de cómo interaccionen entre sí. En el caso de la ley de los grandes números entendemos bien el principio matemático que subyace a esa universalidad; de hecho, se enseña de manera habitual en las clases de probabilidad y estadística. En otras situaciones, sin embargo, nuestra comprensión matemática del fenómeno dista mucho de ser completa.

La misma ley de distribución se observa en las energías de resonancia de los núcleos atómicos, los tiempos de espera de los autobuses de Cuernavaca o la secuencia de números primos

Después de la ley anterior, tal vez el siguiente ejemplo por orden de importancia lo hallemos en el teorema del límite central (llamado a menudo «teorema central del límite»). Este se aplica a cantidades que surgen como combinación de un gran número de componentes que fluctúan de manera aleatoria e independiente. A grandes rasgos, nos dice que, si ninguno de dichos componentes ejerce una influencia predominante, la cantidad en cuestión quedará aproximadamente distribuida según una campana de Gauss, o distribución normal. Decimos que esta ley es universal porque se cumple con independencia de cuántos componentes haya y de cómo fluctúe cada uno de ellos (si bien se torna más exacta a medida que aumenta el número de componentes).

El teorema del límite central se hace patente en una asombrosa variedad de estadísticas: la frecuencia de accidentes de tráfico; las variaciones de altura, peso y otras características propias de cada especie animal; las pérdidas o ganancias debidas al azar; las velocidades de las partículas en un sistema físico, etcétera. El tamaño, la anchura, la posición del máximo e incluso las unidades de medida de cada distribución varían de un caso a otro, pero en todos ellos podrá reconocerse la forma de la campana de Gauss.

Esa convergencia no se debe a ninguna conexión microscópica entre fenómenos tan diversos como un accidente de automóvil, la altura de una persona, los beneficios de una operación bursátil o las velocidades de las estrellas. Aparece como consecuencia de que, en todos esos casos, la «estructura macroscópica» es siempre la misma: una cantidad surgida a partir de múltiples contribuciones pequeñas e independientes. Que el comportamiento macroscópico de un sistema pueda no depender de sus detalles microscópicos constituye la esencia misma de la universalidad.



DÍGITOS MÁS Y MENOS PROBABLES: La ley de Benford establece que, en un amplio abanico de fenómenos naturales, los números que empiezan por 1 son mucho más comunes que el resto. Este histograma reproduce la distribución del primer dígito en las cifras correspondientes al número de habitantes de todas las ciudades alemanas según el censo de 2011. Las barras indican la frecuencia relativa de cada dígito; los puntos rojos, las predicciones de la ley de Benford.

CHRISTOPH PÖPPE/*SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT*. FUENTE: OFICINA FEDERAL DE ESTADÍSTICA DE ALEMANIA, DATOS DE 2011.

Dicha universalidad resulta extremadamente útil en todo tipo de industrias, ya que convierte en manejables situaciones que, de otro modo, serían de una complejidad intratable. Gracias al teorema del límite central, las aseguradoras pueden controlar el riesgo de sus pólizas sin necesidad de conocer los complicados detalles que intervienen en un accidente de tráfico, los astrónomos logran medir el tamaño y la posición de galaxias distantes sin resolver las enrevesadas ecuaciones de la mecánica celeste, y los ingenieros de comunicaciones son capaces de predecir los efectos del ruido y las interferencias sin saber cómo se generan. No obstante, la universalidad del teorema del límite central no es absoluta. Existen casos en los que el teorema no puede aplicarse, razón por la que algunas magnitudes presentan distribuciones distintas de una campana de Gauss.

Algunos primos lejanos del teorema del límite central proporcionan leyes universales para otras magnitudes. Un ejemplo lo hallamos en la ley de Benford, que dicta cómo se distribuye el primer dígito de ciertas cantidades grandes, como la población de un país o el saldo de una cuenta corriente. Sus predicciones resultan algo contraintuitivas, pues, por ejemplo, establecen que una cantidad estadística arbitraria cuenta con una probabilidad seis veces mayor de empezar por 1 que por 9. Entre otras aplicaciones, esta ley —que puede explicarse a partir del teorema del límite central y las propiedades de los logaritmos— se ha usado para detectar fraudes contables, ya que los números inventados, al contrario de los que surgen de forma natural, no se ajustan a la ley de Benford.

En un espíritu similar, la ley de Zipf gobierna la manera en que se distribuyen ciertas cantidades estadísticas, como la población de los mayores países del mundo o la frecuencia con que aparecen las palabras más comunes de un idioma. Esta ley nos dice que la magnitud de la cantidad en cuestión resulta inversamente proporcional a su rango (es decir, a la posición que ocupa en la tabla que las ordena de mayor a menor). Así, la décima palabra más usada en un texto aparecerá en torno a la mitad de veces que la quinta. La ley no suele funcionar demasiado bien para los dos o tres primeros elementos de la lista, pero se cumple con bastante buena aproximación para los siguientes. Sin embargo, al contrario de lo que ocurre con el teorema del límite central o con la ley de Benford, cuyo origen matemático se entiende bien, la ley de Zipf constituye básicamente una ley empírica derivada de la observación, que, por el momento, carece de explicación matemática satisfactoria.

TRANSICIONES DE FASE

Las leyes universales que hemos mencionado hasta ahora describen el comportamiento de magnitudes estadísticas individuales: cantidades numéricas que surgen a partir de la combinación de un gran número de contribuciones pequeñas e independientes. Sin embargo, existen otras leyes universales cuyo dominio de aplicación va más allá de la simple estadística numérica. Por ejemplo, las que gobiernan las transiciones de fase en física y química.

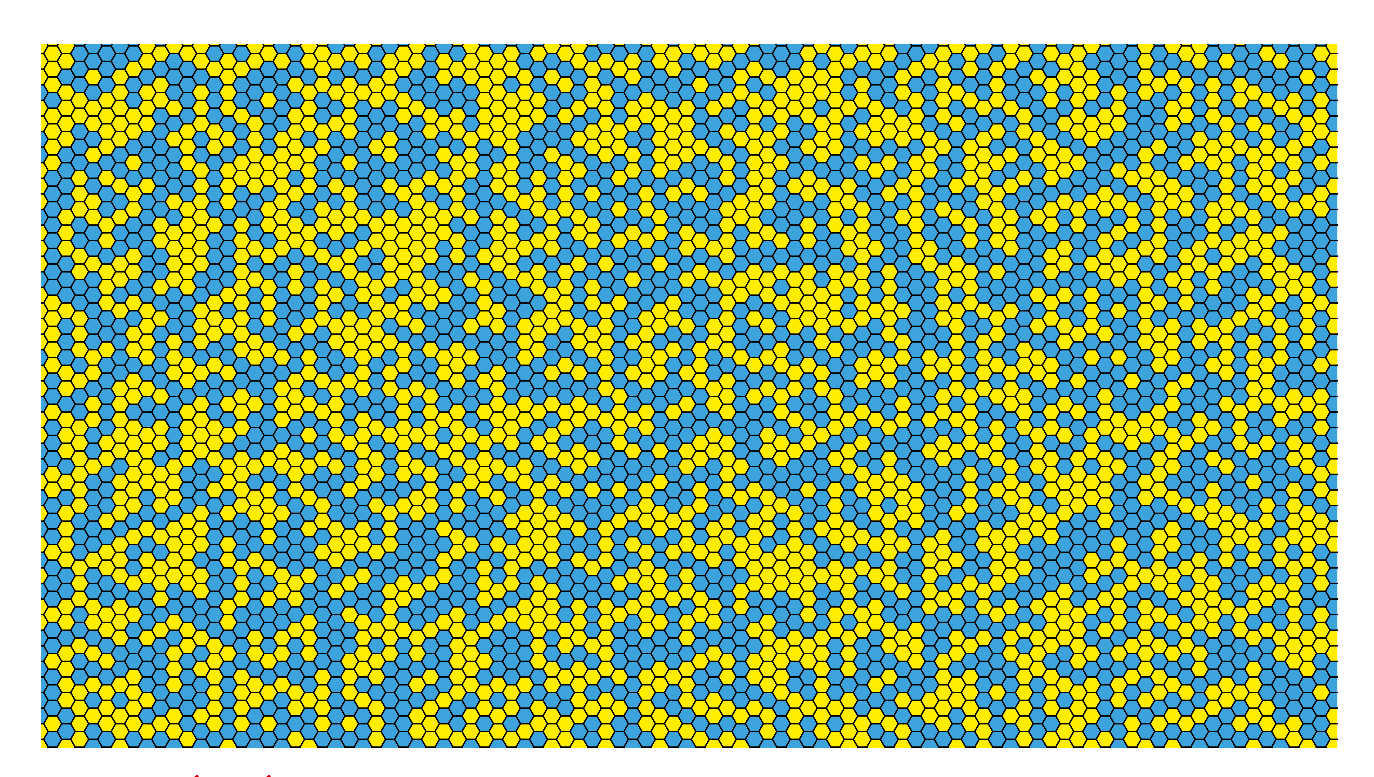
Como todos hemos aprendido en la escuela, la materia puede presentarse en diferentes estados, o fases. Estos incluyen los tres estados clásicos (sólido, líquido y gaseoso), pero también otros más exóticos, como plasma o superfluido. Los materiales ferromagnéticos, como el hierro, pueden encontrarse magnetizados o sin magnetizar. También hay sustancias que conducen la electricidad a determinadas temperaturas pero que se tornan aislantes a otras. En general, el estado en que se encuentra un material depende de factores como la temperatura y la presión (en algunos sustancias, la cantidad de impurezas también desempeña un papel relevante).

A presión fija, la mayoría de los materiales adopta una fase cuando su temperatura supera cierto valor crítico y otra a temperaturas menores. Sin embargo, el comportamiento más interesante surge cuando la temperatura se halla muy próxima al punto crítico que separa ambos dominios. El material, que no se encuentra por completo en ninguno de los dos estados, tiende a dividirse en regiones con bellas geometrías fractales, cada una de las cuales se encontrará en una de las dos fases.

En la naturaleza existen infinidad de materiales, cada uno de ellos caracterizado por una serie de parámetros fundamentales, como la temperatura de ebullición. Físicos y químicos han ideado una ingente cantidad de modelos para describir las diferentes sustancias y sus transiciones de fase. En ellos, suele considerarse que cada átomo o molécula se encuentra unido a sus vecinos por un número de enlaces asignado mediante reglas probabilísticas.

Desde un punto de vista microscópico, todos esos modelos difieren unos de otros. A modo de ejemplo, consideremos las dos figuras de las páginas siguientes. Ambas reproducen la estructura a pequeña escala de dos modelos de percolación típicos (aquellos que describen cómo se filtra un líquido a través de una sustancia porosa o, de manera más general, las diferentes formas de conectar nodos en un retículo). La primera muestra un mosaico de celdas hexagonales, cada una de las cuales puede interpretarse como una molécula en uno de dos estados posibles. La segunda corresponde a un retículo en el que cada nodo representa una molécula y, cada arista, un enlace, el cual puede estar activado o no. Podemos pensar que tanto las baldosas como los enlaces tienden a cambiar de estado cuando cierto parámetro, como la temperatura, alcanza un valor crítico.

Las imágenes ilustran la situación cuando ambos sistemas se encuentran muy próximos al punto crítico. En ambos casos aparecen regiones conexas, ya sea mediante baldosas del mismo color o mediante enlaces activos. Sin embargo, si examina-



PERCOLACIÓN CRÍTICA: **Existen varias maneras de modelizar las filtraciones de un fluido por un medio poroso. En un modelo de celdas (*arriba*), cada casilla puede encontrarse «llena» (*amarillo*) o «vacía» (*azul*). En un modelo reticular (*página opuesta*), las uniones entre nodos pueden estar activas (*marcadas*) o inactivas (*sin marcar*). Estas imágenes muestran el aspecto de uno y otro modelo durante una transición de fase. En ambos casos se observa la aparición de regiones conexas cuyos tamaños recorren todas las escalas: un comportamiento universal típico de los cambios de fase.**

CHRISTOPH PÖPPE/SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

mos dichas zonas «desde lejos» y analizamos sus propiedades, comprobaremos que las diferencias entre un modelo y otro desaparecen. Las distintas regiones conexas adoptan formas y tamaños aleatorios, pero su estructura es casi siempre fractal: si ampliamos una porción cualquiera de una de esas zonas, su aspecto resultará muy similar al de la región completa.

Cerca del punto crítico, algunas cantidades, como el número de regiones conexas, sus tamaños o la frecuencia con que dos puntos cualesquiera quedan conectados, obedecen sencillas leyes de potencias (similares en cierto modo a la ley de Zipf, aunque no del todo idénticas). Tales leyes se han observado en todo tipo de fenómenos naturales y surgen en casi cualquier modelo matemático que describa transiciones de fase continuas. Al igual que ocurre con otras leyes universales, los detalles microscópicos del sistema tal vez afecten a los valores concretos de algunos parámetros, como la temperatura crítica, pero la estructura básica de la ley resulta idéntica en todos los materiales y modelos.

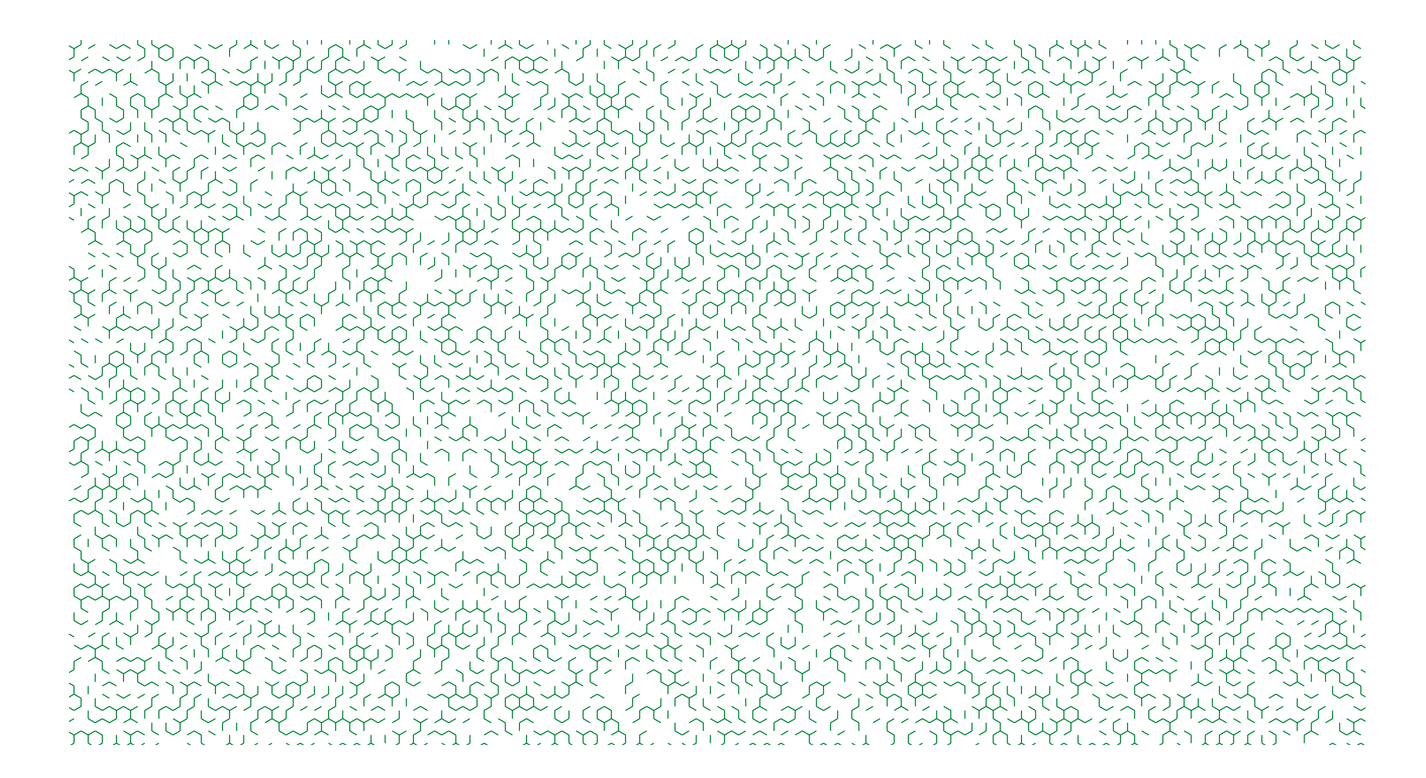
Al contrario de lo que sucede con las leyes universales «clásicas», como el teorema del límite central, la razón última por la que en las transiciones de fase emerge un comportamiento universal aún no se entiende bien. Los físicos cuentan desde hace años con algunos argumentos heurísticos que explican o confirman buena parte de esas leyes, basados en una potente —aunque no del todo rigurosa— herramienta llamada grupo de renormalización. Sin embargo, la obtención de una demostración formal del fenómeno constituye un reto pendiente y un área de investigación muy activa. En agosto de 2010, el matemático de la Universidad de Ginebra Stanislav Smirnov recibió la medalla Fields por establecer de manera rigurosa la validez de estas leyes en algunos modelos fundamentales, como el de percolación en un retículo triangular.

NÚCLEOS ATÓMICOS Y TEORÍA DE NÚMEROS

Antes de concluir nuestro recorrido por las leyes universales, me gustaría mencionar un ejemplo más cercano a mi área de investigación. En este caso, el objeto de estudio no es una magnitud numérica, como ocurre con el teorema del límite central, ni una forma geométrica, como en las transiciones de fase, sino un espectro discreto: una secuencia de puntos esparcidos a lo largo de una recta.

Tal vez el ejemplo más cotidiano de un espectro discreto lo hallemos en las frecuencias usadas por las emisoras radiofónicas: frecuencias del espectro electromagnético pertenecientes a la banda de radio, las cuales podemos sintonizar ajustando el dial de nuestro aparato receptor. A fin de evitar las interferencias, dichas frecuencias suelen mantenerse relativamente separadas unas de otras.

Otro caso familiar de espectro discreto lo encontramos en las líneas de emisión atómicas; es decir, en las frecuencias de la luz que, según las leyes de la mecánica cuántica, pueden radiar y absorber los electrones de un orbital atómico. Aquellas frecuencias pertenecientes a la parte visible del espectro electromagnético dan a los distintos elementos sus colores característicos, desde el azul del argón (que, curiosamente, suele ser el gas empleado en las luces «de neón» —el neón emite luz naranja—), hasta el amarillo del sodio. En los elementos simples, como el hidrógeno, las líneas espectrales siguen una pauta regular y las ecuaciones de la mecánica cuántica pueden resolverse de manera exacta con relativa facilidad. En los más pesados, sin embargo, las líneas



se complican y no resulta nada sencillo deducir su estructura a partir de primeros principios.

Aunque menos conocido, un fenómeno análogo tiene lugar en los procesos de dispersión de neutrones por un núcleo atómico pesado, como el de uranio 238. Las leyes del electromagnetismo y las interacciones nucleares, combinadas con los principios de la mecánica cuántica, nos dicen que, para ciertos valores de la energía, el neutrón atravesará el núcleo sin inmutarse; pero, para otros, conocidos como «energías de resonancia», el neutrón rebotará contra el núcleo. La estructura interna de un núcleo atómico resulta tan intrincada que, hasta la fecha, nadie ha logrado calcular las energías de resonancia mediante técnicas analíticas ni numéricas. Ello nos deja a solas con los datos empíricos como única opción para describir el fenómeno.

Dichas energías de resonancia presentan una distribución de sumo interés. No son independientes unas de otras, sino que parecen obedecer cierta «ley de repulsión» que hace poco probable que dos resonancias consecutivas se encuentren demasiado cerca (algo similar a lo que ocurre con las frecuencias de radio, solo que debido a un fenómeno natural y no a una regulación administrativa). En los años cincuenta, el célebre físico Eugene Wigner propuso un modelo matemático para explicarlas: un ejemplo de lo que hoy denominamos modelos de matrices aleatorias.

Los detalles matemáticos de tales modelos resultan demasiado técnicos para describirlos aquí. Baste decir que, en general, pueden interpretarse como una colección de masas conectadas por muelles cuyas constantes de elasticidad han sido escogidas al azar. Un sistema así oscila («resuena») con ciertas frecuencias características. Wigner postuló que, en el caso de un núcleo atómico de gran tamaño, sus resonancias guardarían ciertas semejanzas con las de un modelo de matrices aleatorias; en particular, que ambas obedecerían la misma ley de separación. Dado que en un modelo de matrices aleatorias dicha ley sí puede demostrarse de manera rigurosa, eso explicaría de manera heurística el comportamiento de los núcleos atómicos.

Por supuesto, un núcleo atómico no guarda ninguna semejanza con una colección de muelles; entre otras razones, porque el primero obedece leyes cuánticas, y el segundo, clásicas. Hoy sabemos que dicho comportamiento constituye la manifestación de una ley universal común a un gran número de espectros, algunos de los cuales poco podrían tener que ver con los núcleos atómicos o con los modelos de matrices aleatorias. Por ejemplo, la misma distribución se ha observado en los tiempos de espera de los autobuses en la ciudad mexicana de Cuernavaca (sin que, de nuevo, dispongamos de una explicación convincente sobre su origen).

Quizá la manifestación más inesperada de la universalidad de dicha ley provenga de un área completamente desconectada: la teoría de números. Los números primos se distribuyen de forma irregular entre los enteros; pero, si llevamos a cabo un análisis espectral de dicha distribución, observaremos la existencia de ciertas oscilaciones —en ocasiones denominadas «música de los números primos»— cuyas frecuencias quedan descritas por una secuencia concreta de números complejos: los ceros no triviales de la función zeta (ζ) de Riemann, estudiada por Bernhard Riemann en 1859 (para la discusión que sigue, no resulta necesario conocer la definición precisa de la función zeta). En principio, dicha secuencia numérica codifica todo lo que deseemos saber sobre los números primos.

Una de las cuestiones abiertas más famosas en matemáticas es la hipótesis de Riemann, la cual conjetura que todos los ceros no triviales de la función zeta se encuentran situados sobre la misma recta del plano complejo. Dicha hipótesis implica consecuencias de primer orden en teoría de números y, en particular, en lo que atañe a los números primos. Y, si bien es cierto que deja varias preguntas sin resolver (en parte, porque no nos dice demasiado acerca de cómo se distribuyen exactamente los ceros en la mencionada recta), existen sobrados indicios numéricos de que los ceros no triviales de la función zeta obedecen la misma ley que se observa en la dispersión de neutrones y en otros sistemas físicos: en particular, los ceros

CHRISTOPH PÖPPE/SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

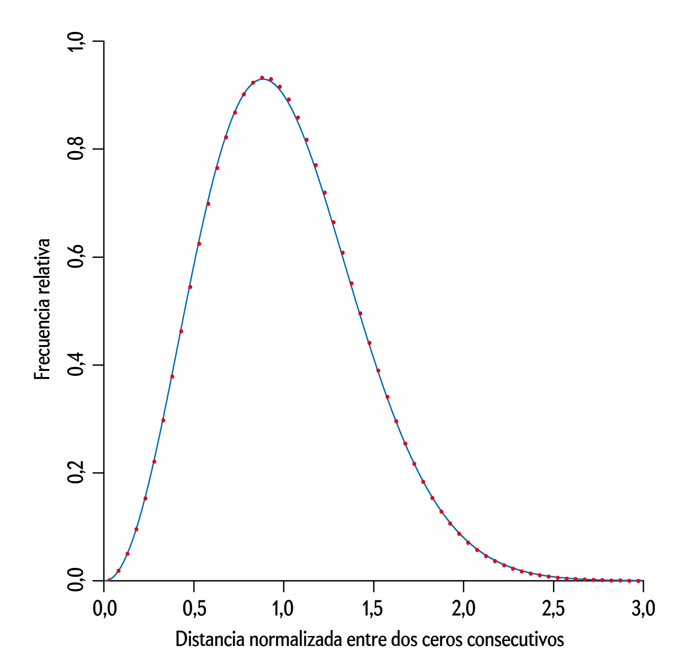
parecen «repelerse» entre sí de un modo que coincide, con una precisión asombrosa, con las predicciones de la teoría de matrices aleatorias. La descripción formal de esta ley recibe el nombre de hipótesis del «conjunto unitario gaussiano» (GUE, por sus siglas en inglés, un ejemplo fundamental de modelo de matrices aleatorias). Al igual que ocurre con la hipótesis de Riemann, por ahora nadie ha conseguido demostrarla, pero también implica consecuencias de suma importancia para la distribución de los números primos.

Los orígenes de esa conexión entre la «música de los números primos» y los niveles de energía de los núcleos atómicos se remontan al año 1972. La historia, hoy legendaria en círculos matemáticos, trata de un encuentro casual en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton entre el matemático Hugh Montgomery y el célebre físico Freeman Dyson. Por aquel entonces, Montgomery investigaba la distribución de los ceros de la función zeta; en concreto, las propiedades de cierta cantidad estadística conocida como función de correlación entre pares de ceros. En su libro *Stalking the Riemann hypothesis* («Al acecho de la hipótesis de Riemann»; Pantheon Books, 2005), Dan Rockmore, matemático e ingeniero informático del Colegio Universitario Dartmouth, relata así el episodio:

> Tal y como lo recuerda Dyson, él y Montgomery se habían cruzado alguna vez en la guardería del Instituto de Estudios Avanzados al ir a llevar o a buscar a sus hijos, pero nunca se habían presentado formalmente. Pese a la fama de Dyson, Montgomery no veía razón para hacerlo: «¿De qué vamos a hablar?», habría argumentado al ser preguntado por el asunto. Al final Montgomery cedió y, tras presentarse, el afable físico preguntó al joven experto en teoría de números sobre su trabajo. Este comenzó a explicarle sus resultados sobre la función de correlación a dos puntos, pero, al poco, Dyson le frenó en seco: «¿Ha obtenido esto?» y garabateó una ecuación. Montgomery casi cayó al suelo de la sorpresa: Dyson acababa de escribir la función del seno cardinal correspondiente a la correlación entre pares de ceros. [...] Mientras que Montgomery había recorrido el camino propio de un experto en teoría de números para llegar a una «versión» de la función de correlación inspirada en los números primos, Dyson había obtenido la misma fórmula a partir del estudio de los niveles de energía en los modelos de matrices aleatorias.

A principios de los años ochenta, el hallazgo de Montgomery y Dyson recibió considerable apoyo numérico gracias al trabajo de Andrew Odlyzko, matemático de la Universidad de Minnesota. Por supuesto, ello no significa que las propiedades de los números primos dependan de la energía nuclear ni que la física atómica esté gobernada por los números primos. Sin embargo, sí nos sugiere la existencia de una ley tan universal que emerge en todo tipo de ámbitos, desde la física nuclear y los modelos de matrices aleatorias hasta la teoría de números.

El mecanismo último que subyace a dicha ley está aún por descubrir. En particular, no contamos con una explicación convincente —no digamos ya una demostración formal— de por qué los ceros de la función zeta obedecen la hipótesis del GUE. Sin embargo, existe una cantidad nada despreciable de trabajo riguroso que apoya la universalidad de esta hipótesis. Hoy sabemos que, además del GUE, otros muchos modelos de matrices aletorias obedecen la misma ley universal. Y aunque esas demostraciones rigurosas aún no se han extendido al ámbito de la teoría de números o a la física atómica, sí apoyan de manera indirecta la validez de la ley en tales casos.



ESPECTRO UNIVERSAL: Los ceros de la función zeta de Riemann parecen distribuirse de un modo muy similar a las frecuencias de resonancia que aparecen en algunos modelos de matrices aleatorias usados en física nuclear. La figura muestra la distribución «empírica» (obtenida a partir del cálculo numérico de miles de millones de ceros de la función zeta, *rojo*) y las predicciones de la teoría de matrices aleatorias (*azul*). La razón última de este comportamiento común aún se desconoce.

Aunque no entraré en los argumentos técnicos empleados en dichos trabajos, sí esbozaré una de las ideas clave que, junto con mi colaborador Van Vu, ahora en Yale, tomamos prestada de una antigua demostración del teorema del límite central elaborada en 1922 por Jarl Lindeberg. En términos del análogo mecánico de muelles y masas mencionado arriba, la estrategia consiste en reemplazar uno de los muelles por otro escogido al azar y, después, demostrar que la distribución de frecuencias no se ve alterada de forma significativa. Al aplicar esta operación a cada uno de los muelles, el modelo de matrices acaba convirtiéndose en uno muy diferente, pero las propiedades esenciales de la distribución no se ven afectadas. Gracias a ello, puede demostrarse que clases enteras de modelos de matrices aleatorias obedecen básicamente la misma ley.

Se trata de un área de investigación muy activa y en la que los avances se suceden con rapidez. En 2011, de manera simultánea a la aparición de mi trabajo con Vu, László Erdős, ahora en el Instituto de Ciencia y Tecnología de Austria, Benjamin Schlein, de la Universidad de Bonn, y Horng-Tzer Yau, de Harvard, obtuvieron otras demostraciones relativas a la universalidad en los modelos de matrices aleatorias a partir de ideas tomadas de la física matemática.

LOS LÍMITES DE LA UNIVERSALIDAD

Existen otras muchas leyes universales en matemáticas y física. Los ejemplos mencionados aquí no suponen más que una pequeña fracción de todas las leyes de este tipo que, a lo largo de los años, se han descubierto en áreas que van desde los siste-

CHRISTOPH PÖPPE/*SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT*, A PARTIR DE «THE 10^{22}-ND ZERO OF THE RIEMANN ZETA FUNCTION»; ANDREW M. ODLYZKO EN *DYNAMICAL, SPECTRAL, AND ARITHMETIC ZETA FUNCTIONS*; AMERICAN MATHEMATICAL SOCIETY, 2001.

mas dinámicos hasta la teoría cuántica de campos. Buena parte de las leyes macroscópicas de la física, como las empleadas en termodinámica o dinámica de fluidos, son universales, ya que los detalles microscópicos del sistema se tornan irrelevantes excepto por su influencia en el valor de ciertos parámetros, como la viscosidad, la compresibilidad o la entropía.

Con todo, incluso el principio de universalidad tiene sus limitaciones. El teorema del límite central, por ejemplo, predice una distribución gaussiana para toda cantidad surgida a partir de múltiples contribuciones pequeñas e independientes. Pero, como todo teorema, falla cuando sus requisitos no se satisfacen. Si consideramos la distribución de alturas entre todos los humanos adultos (hombres y mujeres), veremos que no obedece una ley gaussiana. Ello se debe a que un solo factor, el sexo, ejerce un impacto tan predominante sobre la altura que sus efectos no pueden enmascararse por las fluctuaciones aleatorias de los factores genéticos o ambientales.

El teorema del límite central también falla cuando las contribuciones individuales no fluctúan de manera independiente, sino correlacionada, por lo que tienden a crecer o menguar al unísono. En tales casos, las distribuciones pueden mostrar «colas gruesas» (conocidas coloquialmente como «cisnes negros»), en las que la magnitud en cuestión se aleja de la media mucho más de lo que predice el teorema del límite central. Este fenómeno reviste gran importancia en finanzas, sobre todo cuando se intenta modelizar el comportamiento de algunos productos financieros complejos. Un ejemplo lo hallamos en las obligaciones de deuda garantizada (CDO, por sus siglas en inglés), las cuales se construyen agregando hipotecas. Su riesgo puede estimarse a partir del teorema del límite central siempre y cuando las hipotecas fluctúen de manera independiente. Sin embargo, en la reciente crisis financiera —un ejemplo de libro de cisne negro—, esa condición de independencia se vino abajo de forma espectacular, lo que ocasionó enormes pérdidas a los tenedores de CDO y a sus aseguradoras. Como siempre, un modelo matemático solo es válido en tanto que lo sean sus hipótesis.

Una tercera situación en la que el principio de universalidad falla se da cuando el sistema carece de suficientes grados de libertad. Por ejemplo, los cosmólogos se basan en leyes universales para describir el movimiento de galaxias enteras; sin embargo, calcular la trayectoria de un satélite sometido a la influencia gravitatoria de tres cuerpos puede convertirse en un problema de complejidad abrumadora.

De igual modo, las leyes de la mecánica de fluidos pierden su validez cuando consideramos sistemas de escala mesoscópica, aquellos mayores que una molécula pero menores que la escala típica a partir de la cual podemos aplicar leyes universales. Así sucede en el torrente sanguíneo: las células que componen la sangre presentan un tamaño considerable en comparación con el diámetro típico de los vasos, por lo que deben considerarse como un sistema de agentes mesoscópicos que exhibe un comportamiento complejo. Lo mismo ocurre con los fluidos coloidales, como el barro, así como con algunos nanomateriales o con los puntos cuánticos. En general, modelizar el comportamiento de tales sistemas plantea verdaderos retos.

Por otro lado, hay un gran número de situaciones macroscópicas en las que simplemente no parece que rija ninguna ley universal, sobre todo cuando intervienen agentes humanos. El mercado de valores nos brinda un buen ejemplo. Pese a todos los esfuerzos, nadie ha hallado una ley universal que describa las fluctuaciones de la Bolsa; al igual que en el ejemplo mencionado más arriba, el teorema del límite central no parece ser aplicable. Una razón estriba en que, toda vez que se detecte una regularidad, aparecerán agentes que la explotarán hasta que desaparezca. Por el mismo motivo, encontrar leyes universales en macroeconomía viene a ser como disparar a un blanco en constante movimiento. Según la ley de Goodhart, siempre que en los datos económicos aparece una regularidad estadística y esta se convierte en objeto de acción política, dicha regularidad acaba desmoronándose. (Aunque, irónicamente, puede argumentarse que la ley de Goodhart sí constituye un ejemplo de ley universal.)

Por último, existen situaciones gobernadas por leyes universales en las que, sin embargo, resulta casi imposible emplear dichas leyes para hacer predicciones. El movimiento de un fluido, por ejemplo, queda descrito por las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas se emplean para pronosticar el tiempo meteorológico, pero sus soluciones son tan complejas e inestables que, aun con la ayuda de las computadoras más potentes, el tiempo solo puede predecirse con una o dos semanas de antelación. (Por «inestable» queremos decir que incluso un pequeño error en las mediciones o en los cálculos numéricos puede generar grandes cambios en las predicciones.)

Así pues, entre los sistemas macroscópicos que obedecen alguna ley universal y los fenómenos simples que pueden estudiarse a partir de leyes fundamentales media un extenso territorio. En él conviven sistemas demasiado intrincados para describirlos a partir de primeros principios y, al mismo tiempo, demasiado simples para ser universales. Un amplio abanico de posibilidades, en definitiva, para acomodar la complejidad de la vida tal y como la conocemos.

PARA SABER MÁS

The 1022-nd zero of the Riemann zeta function. Andrew M. Odlyzko en *Dynamical, spectral, and arithmetic zeta functions*, dirigido por M. van Frankenhuysen y M. L. Lapidus. American Mathematical Society, 2001. Disponible en **www.dtc.umn.edu/~odlyzko/doc/zeta.10to22.pdf**

Random matrices: Universality of ESD and the circular law. Terence Tao, Van Vu y Manjunath Krishnapur en *The Annals of Probability*, vol. 38, n.º 5, 2010. Disponible en **arxiv.org/abs/0807.4898**

Random matrices: Universality of local eigenvalue statistics. Terence Tao y Van Vu en *Acta Mathematica*, vol. 206, n.º 1, marzo de 2011. Disponible en **arxiv.org/abs/0906.0510**

A second draft of a non-technical article on universality. Terence Tao en **terrytao.wordpress.com/2010/09/14/a-second-draft-of-a-non-technical-article-on-universality**. Versión preliminar de este texto en el blog personal del autor; incluye imágenes, referencias y aclaraciones adicionales.

EN NUESTRO ARCHIVO

Problemas físicos con muchas escalas de longitud. Kenneth G. Wilson en *IyC*, octubre de 1979.

La misteriosa ley del primer dígito. Juan M. R. Parrondo en *IyC*, diciembre de 2002.

Números y palabras. Juan M. R. Parrondo en *IyC*, febrero de 2003.

Más sobre números y palabras. Juan M. R. Parrondo en *IyC*, marzo de 2003.

El espectro del riemannio. Brian Hayes en *IyC*, enero de 2004.

La percolación, un juego de mosaicos aleatorios. Hugo Duminil-Copin en *IyC*, enero de 2012.

Un nuevo pilar para la física estadística. Daniel Meyer y Dirk Schleicher en *IyC*, marzo de 2012.



EXTRAÑO INFILTRADO: Una araña mirmecomorfa se oculta debajo de un grupo de hormigas tejedoras asiáticas, el insecto escogido por el arácnido como modelo.



BIOLOGÍA

La farsa de la araña

Algunos arácnidos llegan a extremos insospechados para imitar el aspecto y el comportamiento de las hormigas

Ximena Nelson

EN SÍNTESIS

El mimetismo consiste en imitar el aspecto de otro ser vivo. El disfraz de hormiga representa la forma más común de mimetismo animal, aunque paradójicamente es la menos conocida.

Estudios recientes han dejado al descubierto a los suplantadores de hormigas y han desvelado la insospechada complejidad que se oculta tras este comportamiento.

Parece ser que los animales se sirven del mimetismo con múltiples fines, pero pagan un precio por las ventajas que reporta.

Ximena Nelson es profesora de etología en la Universidad de Canterbury en Christchurch, Nueva Zelanda. Especialista en comunicación y cognición animal, sus estudios se centran en las arañas saltadoras y en las aves.



Los impostores abundan en el reino animal. Hojee un libro que contenga la definición de mimetismo (la imitación del aspecto de un ser vivo por otro) y hallará ejemplos clásicos como el de la mariposa virrey y la monarca, la inofensiva serpiente rey y la venenosa coral, o los sírfidos, un tipo de moscas que adoptan el disfraz de abeja o avispa. Menos conocido, pero en muchos aspectos más fascinante, es el mimetismo de las arañas saltadoras del género *Myrmarachne*, que a ojos del común semejan hormigas.

En contraste con otras arañas saltadoras rechonchas y velludas, el cuerpo lampiño y lustroso de las *Myrmarachne* muestra todo el aspecto de una hormiga, con tres claras divisiones: cabeza, tórax y abdomen. Para rematar la farsa, caminan sobre los tres pares de patas traseros, dejando libre el cuarto para mantenerlo alzado sobre la cabeza a modo de antenas. Y adoptan incluso la marcha rápida, errática y sin pausa propia de las hormigas, en lugar del movimiento de avance y parada característico de otras arañas saltadoras. Esa interpretación digna de ser premiada constituye el secreto de su éxito como grupo: más de 200 especies de *Myrmarachne* habitan en las selvas tropicales de África, Asia, Australia y América. Tan rica diversidad convierte el mirmecomorfismo (la imitación de las hormigas) en la forma más común de mimetismo, aunque paradójicamente resulte la menos conocida.

Nuevos estudios están poniendo al descubierto la asombrosa complejidad que esconde el mirmecomorfismo. Como la mariposa virrey, la serpiente rey y los sírfidos, las arañas *Myrmarachne* se benefician del parecido con otra especie; en este caso, con una temible hormiga, porque los cazadores de arañas se cuidan mucho de tropezar con ella y con cualquiera que se le parezca. Sin embargo, las arañas pagan un precio por ello: asumen un riesgo considerable por hacer convincente su interpretación. Las fuerzas evolutivas que forjaron la artimaña sitúan a estos animales en el filo de la navaja, sobre una delgada línea entre eludir a un enemigo sin caer presa de otro. Al revelar los peligros inesperados del mimetismo, los estudios de estos singulares arácnidos exponen el fenómeno de un modo inédito.

FINGIR

Mi fascinación por el mimetismo comenzó un día de 1995 en el despacho de mi entonces tutor, Robert Jackson, mientras conversaba con él acerca de los posibles temas de investigación para mi tesis de licenciatura. Jackson, experto en arácnidos de la Universidad de Canterbury en Nueva Zelanda, se ha labrado reputación como aracnólogo con sus trabajos de *Portia*, género de arañas saltadoras famosas por su inteligencia, parecida a la de los mamíferos. Me sugirió primero que trabajase con una especie de *Portia*, pero después de pensarlo me propuso las arañas saltadoras mirmecomorfas de los trópicos. La idea me sedujo al instante. Hoy, veinte años después, ambos somos colegas de laboratorio y hemos recorrido los confines de África, Australia y Asia para estudiar estos extraordinarios animales. En todas las expediciones hemos descubierto numerosas consecuencias poco comunes del mimetismo que ponen de manifiesto el enorme grado de complejidad del arte del engaño, mucho mayor de lo que se pensaba.

La visión tradicional arrancó con el naturalista inglés Henry Walter Bates, quien, a raíz de sus observaciones en mariposas amazónicas, en 1861 formuló la primera teoría científica que pretendía explicar el mimetismo en la naturaleza. Bates supuso que toda especie comestible que se hiciera pasar por un bocado poco apetecible o venenoso para no ser molestada gozaría de una ventaja clara. Según él, los depredadores acaban aprendiendo por cruda experiencia que no conviene devorar este tipo de especies. Después del amargo encuentro, los depredadores evitarán a la especie venenosa y de retruque al imitador, aunque sea inofensivo. Esta farsa «parasitaria» en la que un animal saca provecho de los mecanismos de defensa de otro, se conoce como mimetismo batesiano.

Pero resulta que el mimetismo no opera del modo sencillo y directo que Bates describió, ni mucho menos. Entre otras razones, algunos imitadores aprovechan su parecido con otros animales no para evitar ser comidos, sino para engañar a sus presas y llenar el estómago con su artimaña; es el llamado mimetismo agresivo. Y esta no es la única motivación del mimetismo. Ningún grupo zoológico ilustra mejor los entresijos de la estrategia y las fuerzas evolutivas que lo han conformado como las arañas mirmecomorfas.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS

A los ojos del no iniciado, las hormigas pueden parecer poco merecedoras de imitación. Pero en la pluvisilva tropical, donde su biomasa total supera la de todos los vertebrados juntos, actúan como grandes modeladoras del entorno y ejercen un amplio poder sobre sus moradores, razón por la cual son candidatas perfectas para la imitación.

Las arañas *Myrmarachne* se sirven de la temible reputación de las hormigas: defienden con ferocidad el hormiguero asestando mordiscos y picaduras a cualquier intruso, y la colonia entera puede acudir en auxilio de una sola de ellas, a menudo con consecuencias funestas para el incauto. Por esa razón, los depredadores se guardan mucho de intentar devorar a cualquier insecto con el aspecto de una hormiga. Pero para que las arañas puedan engañar a los depredadores, deben asumir algunos riesgos ostensibles. Sin ir más lejos, han de vivir cerca de las hormigas para no delatar su auténtica naturaleza a los

PÁGINAS ANTERIORES: MARK MOFFETT, NATIONAL GEOGRAPHIC

depredadores. Convivir con tantas vecinas tan cerca, un hecho extraño para la araña pero perfectamente natural para las hormigas, coloca a la farsante en una posición comprometida: si el engaño se descubre, puede acabar convertida en el almuerzo.

Cohabitar con uno de sus enemigos no es el único precio que las arañas mirmecomorfas deben pagar. Su disfraz está tan logrado que los cazadores especializados en devorar hormigas (entre ellos otras arañas saltadoras) las confunden con presas. Y la competencia entre los machos por las hembras agrava aún más el riesgo de ser cazadas. Las caprichosas hembras no ocultan su predilección por los grandes quelíceros (mandíbulas), lo que ha disparado su crecimiento en los machos de *Myrmarachne*, hasta suponer en algunos casos el 50 por ciento de la longitud corporal. Se desconoce por qué prefieren semejantes mandíbulas, aunque podrían representar una señal de vigor. A primera vista, uno podría pensar que este agrandamiento merma las posibilidades de supervivencia de las arañas porque desbarata su disfraz de hormiga. Sí las perjudica, pero de otro modo. El rasgo hace que parezcan hormigas que sujetan algo con la boca. Las fauces de las hormigas son armas temibles y las arañas saltadoras prefieren atacar a las que transportan algo en sus mandíbulas y no pueden morder. Así que las armas de seducción de los machos de *Myrmarachne* también los convierten en una pieza más preciada para los depredadores.

El astuto imitador no está indefenso contra algunas de esas amenazas y hace gala de una sorprendente flexibilidad de comportamiento. Cuando otra araña saltadora mirmecófaga la acecha, la imitadora adopta una pose de ostentación hacia ella: deja de agitar las patas delanteras como antenas y las alza verticalmente sobre la cabeza, al tiempo que fija la mirada en la otra araña sin moverse. Al parecer este gesto revela que es una araña o, por lo menos, que no es una hormiga. Sea como fuere, convence al depredador. De modo similar, cuando un científico inoportuno (y seguramente otros posibles depredadores) aparece e intenta atrapar una araña *Myrmarachne* que trepa por una planta, la farsante deja de comportarse inmediatamente como una hormiga, abandona la vegetación y se esfuma colgada de un hilo de seda.

Un ejemplo especialmente maquiavélico de mirmecomorfismo lo encarna *Myrmarachne melanotarsa*, que aprovecha lo mejor de ambas facetas de un modo distinto, poniendo en entredicho la idea de que el mimetismo parasitario y el agresivo son dos fenómenos diferenciados surgidos de presiones selectivas distintas. El parecido de la araña con las hormigas resulta tan terrorífico para las otras arañas saltadoras normales que *M. melanotarsa* no solo se sirve de ello para no ser cazada, sino también para cazar. Ahuyenta a las infortunadas madres araña e irrumpe en sus nidos para devorar los huevos o las pequeñas arañas. Las hormigas tienen problemas para saquear tales nidos porque sus patas quedan enredadas en las telarañas, pero las arañas disponen de medios para sortear las hebras pegajosas y *M. melanotarsa* hace buen uso de ellas.

¿APRENDIZAJE O INSTINTO?

Para desentrañar por completo las fuerzas evolutivas que han modelado el mimetismo en sus formas actuales es preciso saber los factores que disuaden a los depredadores de atacar a los impostores. De vuelta al siglo XIX, Bates pensaba que el depredador había de experimentar, de alguna manera, el peligro que supone una criatura que está siendo imitada por otra antes de entender que debería mantenerse alejado de la auténtica y de cualquier cosa que se le parezca. Pero de nuevo las arañas mirmecomorfas también incumplen esa idea tradicional. Las arañas saltadoras ordinarias que no devoran ni a las hormigas ni a las arañas *Myrmarachne* actúan guiadas por el instinto, no por lecciones aprendidas a las malas. En otras palabras, las fuerzas que impulsan la evolución han grabado la evitación en los genes de los depredadores.

En retrospectiva, ese instinto de evitación no resulta sorprendente, ya que no hay aprendizaje que valga si uno acaba muerto en el encuentro con una hormiga. En cierta manera, es más sencillo concebir cómo pudo aparecer el instinto: los cazadores que ponen pies en polvorosa cuando se acercan las hormigas tienen más posibilidades de sobrevivir, procrear y perpetuar sus genes; la aversión instintiva acaba predominando en la población y los que carecen de ella no tardan en caer víctimas de las hordas.

BENDITO ENREDO

La complejidad que junto con mis colaboradores hemos descubierto en el sistema mimético de *Myrmarachne* sirve como moraleja: a buen seguro que los intrincados principios expuestos podrán aplicarse también a otros casos de mimetismo. Y todavía queda mucho por aprender. Se ha tendido a ver el mimetismo como la adaptación a la presión selectiva ejercida por un solo depredador a través de un solo sentido: la visión. (Porque es tal la dependencia de la visión de la especie humana que este sentido suele acaparar el interés de los investigadores.) Pero ahora, gracias a *Myrmarachne* sabemos que el mimetismo de una especie está modelado por múltiples depredadores. Nuestro trabajo ha demostrado que así sucede en las arañas saltadoras ordinarias y las mantis, como quizá también en las aves, lagartos y ranas. Y los estudios con otros animales amplían el mimetismo a otros sentidos, como el olfato y el oído. Así, la apetitosa polilla tigre imita las señales acústicas de otra polilla incomestible para no caer presa de los murciélagos que cazan en la oscuridad con ayuda de la ecolocalización. Y algunas mariposas copian las señales químicas segregadas por las hormigas para deslizarse en los hormigueros y poner sus huevos, que quedan a buen recaudo gracias a las belicosas anfitrionas.

Resulta emocionante pensar que contamos ahora con las técnicas necesarias para sondear las experiencias sensoriales de otras especies. Los sensores de alta frecuencia permiten visualizar los sonidos que superan el umbral auditivo humano, como los emitidos por las polillas tigre y los murciélagos; mediante la espectrometría de masas pueden conocerse los perfiles de hidrocarburos de las hormigas y de sus imitadores, lo que ofrece un retrato de sus interacciones químicas. La aplicación de tales técnicas al estudio del mimetismo y de otros fenómenos naturales revelará sin duda mucho más sobre las espectaculares soluciones que depredadores y presas adoptan en su eterna carrera y los costes que estas suponen.

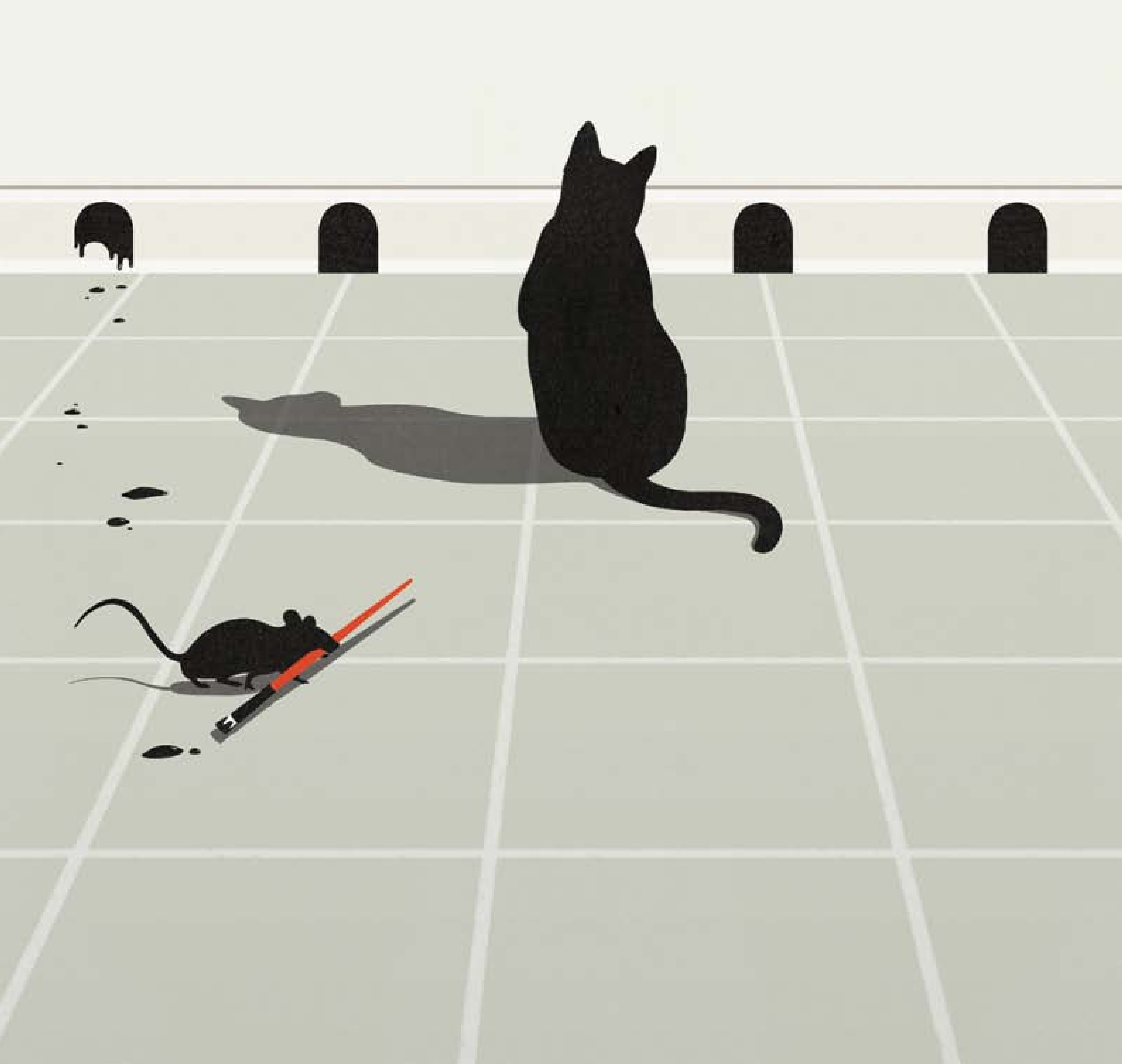
PARA SABER MÁS

Collective batesian mimicry of ant groups by aggregating spiders. Ximena J. Nelson y Robert R. Jackson en *Animal Behaviour*, vol. 78, págs. 123-129, julio de 2009.

Specialized exploitation of ants (Hymenoptera: Formicidae) by spiders (Araneae). Robert R. Jackson y Ximena J. Nelson en *Myrmecological News*, vol. 17, págs. 33-49, 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Una araña saltadora que teje. Robert R. Jackson en *IyC*, noviembre de 1985.
Maestros del disfraz. Peter Forbes en *IyC*, julio de 2011.
Imitación vocal en el mundo animal. Kendra Sewall en *IyC*, agosto de 2013.



INMUNOLOGÍA

LA ILUSIÓN DE LA INMUNIDAD

Los modelos matemáticos de la respuesta inmunitaria sugieren que nuestras defensas cometen errores a la hora de reconocer las sutiles mutaciones del virus de la gripe

Adam J. Kucharski

EN SÍNTESIS

Cuando superamos infecciones causadas por virus, como el sarampión, quedamos inmunizados de por vida contra la enfermedad.

Pero en la gripe la situación es distinta porque el virus cambia levemente de un año a otro, lo que pone en jaque a las defensas del organismo.

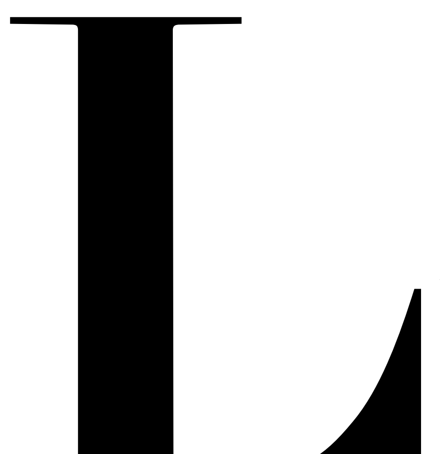
Algunos estudios indican que las primeras cepas gripales que afectan a las personas en la infancia limitan la capacidad para combatir otras cepas en el futuro.

Esta curiosa reacción inmunitaria, bautizada como «el pecado original antigénico», ha sido verificada ahora mediante modelos matemáticos.

ANNA PARINI



Adam J. Kucharski es investigador en el departamento de epidemiología de enfermedades infecciosas de la Escuela de Londres de Higiene y Medicina Tropical.



AS ENFERMEDADES INFECCIOSAS NO TRATAN CON TIBIEZA A LOS NIÑOS. En la escuela pasan el día inmersos en un hervidero de virus y bacterias, carentes del arsenal defensivo que sus padres han tardado toda la vida en componer. Visto así, ser adulto compensa cuando hablamos de muchas infecciones, desde la varicela hasta el sarampión.

Pero la gripe es otro cantar. Los análisis de la pandemia de 2009 han demostrado que la inmunidad generada contra los virus estacionales ordinarios tiende a ser máxima en los niños pequeños, desciende en los adultos de mediana edad y vuelve a repuntar en los ancianos. Los adultos habrán estado más expuestos a la gripe a lo largo de su vida, pero, a excepción de los mayores, de algún modo acaban mostrando una respuesta inmunitaria más débil.

Esa curiosa observación llevó a los biólogos a preguntarse por las causas. Conocer los entresijos de la infección gripal dista de ser sencillo, pero hemos hallado algunas pistas con la ayuda de modelos matemáticos que simulan el sistema inmunitario. Tales modelos permiten explorar de qué modo influye el contacto con el virus en el pasado sobre la respuesta inmunitaria contra las nuevas infecciones; además, muestran la evolución del grado de protección con la edad. Al conjugar estas técnicas con los datos observados estamos comenzando a conocer los mecanismos que generan inmunidad contra la gripe. El trabajo ofrece nuevos indicios de una hipótesis peculiar, propuesta por primera vez hace más de medio siglo. Conocida como «el pecado original antigénico», esta explica por qué la respuesta del organismo a dicha enfermedad se orienta hacia los virus contraídos en la infancia. Los resultados nos están ayudando a entender el motivo de que algunas poblaciones sufrieran estragos con pasados brotes y quizás nos permitan predecir la reacción de diversos colectivos a los brotes del futuro.

UN MODELO EPIDEMIOLÓGICO

Hasta la fecha, la mayoría de los modelos matemáticos de la inmunidad han dejado de lado la reacción del organismo contra el virus de la gripe a causa de la gran variabilidad de este patógeno. En su lugar, se han centrado en la respuesta contra virus como el del sarampión, que varían muy poco con el tiempo y propician una inmunidad permanente. Una vez que los individuos superan esta enfermedad o son vacunados contra ella, el sistema inmunitario reconoce con rapidez las proteínas de la superficie del virus, fabrica anticuerpos contra estas y neutraliza cualquier nuevo intruso que las presente. (Las proteínas de la superficie del virus se denominan antígenos, acrónimo del inglés *anti*body *gen*erator, «generador de anticuerpos»).

Si las personas tienen cierta probabilidad de contraer el sarampión cada año, cabe suponer que con el paso del tiempo la inmunidad (medida con el análisis de la potencia de los anticuerpos del individuo en la sangre) aumente gradualmente, tal y como se ha observado en varios estudios de laboratorio con diversos grupos de edad. Para comprobar esa idea puede recurrirse a un modelo matemático, que muestra los patrones que cabría esperar si la teoría fuera cierta. Los modelos son instrumentos poderosos porque permiten examinar los efectos de procesos biológicos cuya reproducción en experimentos reales resultaría difícil o éticamente cuestionable. Se puede analizar así de qué modo influye un virus en la inmunidad de una población entera sin infectar deliberadamente a ninguna persona.

En el modelo epidemiológico más sencillo, la población se divide en tres grupos: los que pueden ser infectados, los enfermos y los que se han recuperado y, por tanto, son inmunes a la enfermedad. Durante la década de los ochenta del siglo xx, el epidemiólogo Roy M. Anderson, el zoólogo Robert M. May y sus colaboradores usaron este tipo de modelos para examinar la distribución de la inmunidad ante una enfermedad como el sarampión en función de la edad. El modelo de tres compartimentos reproducía a grandes rasgos la situación, pero observaron que la inmunidad de los más jóvenes aumentaba más rápido de lo calculado. ¿Obedecía esa discrepancia al mayor número de contactos que entablaban los niños respecto a los individuos de más edad? Los investigadores retocaron el modelo con el propósito de incluir esa variación y poner a prueba la predicción. En efecto, la modificación de los cálculos para asignar a los niños un riesgo de infección mayor permitió recrear los cambios observados en la respuesta inmunitaria con la edad.

Por desgracia, la inmunidad contra la gripe no resulta tan sencilla. Los virus de esta enfermedad experimentan mutaciones a un ritmo acelerado, por lo que el aspecto de sus antígenos varía de año en año [*véase* «Evolución vírica en la era genómica», por Raúl Rabadán; Investigación y Ciencia, abril de 2012]. No es extraño que al organismo humano le cueste reconocer las cepas nuevas. Semejante variabilidad explica por qué se necesita renovar las vacunas antigripales cada pocos años; a diferencia del virus del sarampión, cuyo aspecto apenas varía, los antígenos del virus de la gripe cambian, y mucho.

Cuando nos dimos cuenta de la inusual distribución de la inmunidad antigripal según la edad en los datos de 2009, nos preguntamos si la elevada tasa de mutación del virus, combinada con el intenso contacto social de los niños, tendría algo que ver con el perfil de pico-valle-pico observado. Las personas están expuestas a multitud de infecciones en su juventud, por lo que tienden a crear una inmunidad duradera contra el grueso de los virus que existieron durante su infancia. En lo que atañe a la gripe,

los niños sintetizan anticuerpos contra los antígenos de los virus en cuestión, igual que hacen contra el sarampión.

Al término del instituto o de la universidad, el número de contactos con el prójimo desciende y la gripe se contrae con menor frecuencia. Este cambio de exposición significa que las defensas de los adultos frente a nuevas agresiones se basan en los anticuerpos fabricados durante la infancia. Pero como el virus de la gripe cambia con el tiempo, los anticuerpos «antiguos» pierden destreza en reconocer las cepas nuevas con el paso de los años. Siguiendo esta lógica, cabría esperar que los niveles de protección natural descendiesen en los adultos de mediana edad, que en general no reciben vacunas antigripales con regularidad. Y puede aventurarse que el posterior repunte de la inmunidad observado en las personas ancianas sea el resultado de las vacunas antigripales administradas, que mantienen sus anticuerpos al día.

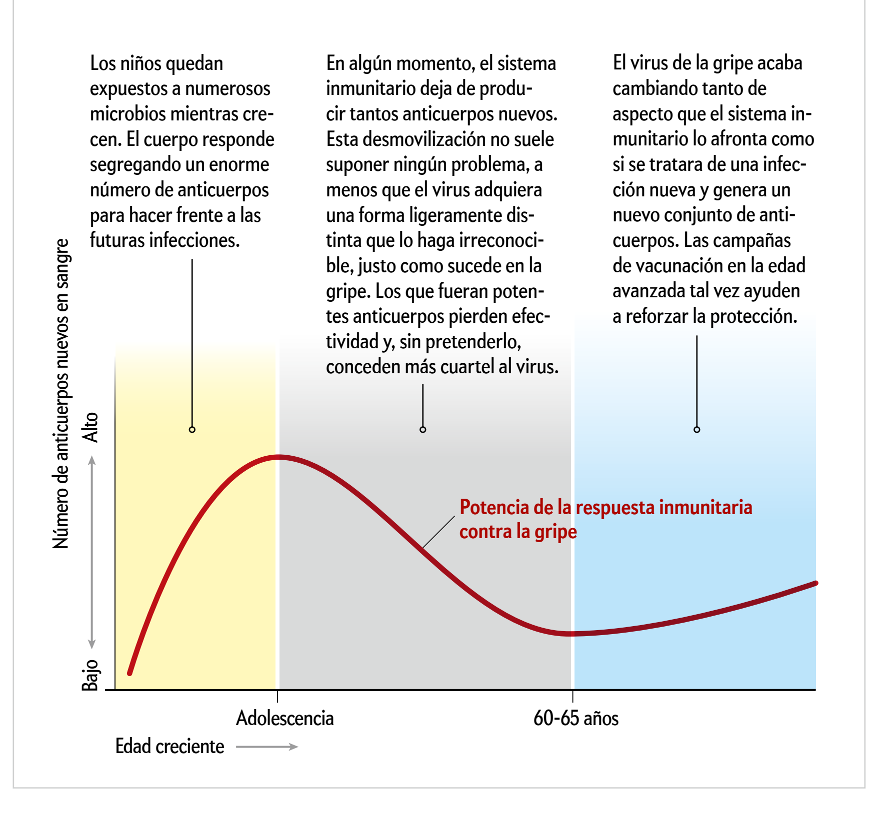
Por lo menos, esa era la teoría. El problema estribaba en cómo demostrarla. La variabilidad de la gripe es tal que resulta mucho más difícil elaborar un modelo matemático que en el caso del sarampión. Una persona puede ser inmune a una cepa, pero puede serlo solo en parte a otra y totalmente vulnerable a una tercera. Así pues, el estudio de la inmunidad exige llevar un registro minucioso de la combinación de cepas gripales a las que quedan expuestas las personas y el orden en que tienen lugar esas exposiciones.

Y ahí radica la dificultad, debido al vasto número de combinaciones de cepas que las personas pueden contraer. Supongamos que en el pasado han circulado 20 cepas del virus; en tal caso, un individuo habría podido sufrir 2^{20} historias de infecciones (más de un millón); con 30 cepas se alcanzarían más de mil millones de combinaciones.

EXPLICACIÓN DEL ENIGMA

Las primeras impresiones son las que perduran

La mayoría de las veces en que el cuerpo humano vence a un virus, el sistema inmunitario confiere protección permanente contra las futuras infecciones por el mismo patógeno. Los adultos cuentan pues con más defensas que los niños y enferman con menor frecuencia. No sucede así con la gripe. Como cabe esperar, la inmunidad crece durante la infancia, pero en la mediana edad disminuye (*curva*). Se ha planteado la siguiente explicación: el sistema inmunitario comete algún tipo de error con la gripe y espera equivocadamente a que las nuevas infecciones de este virus mutable se asemejen a las primeras. Al concentrar su respuesta contra lo que en realidad son amenazas desfasadas, el cuerpo no combate con eficacia las nuevas.



FUENTE: THE ROLE OF SOCIAL CONTACTS AND ORIGINAL ANTIGENIC SIN IN SHAPING THE AGE PATTERN OF IMMUNITY TO SEASONAL INFLUENZA, POR ADAM J. KUCHARSKI Y JULIA R. GOG, EN *PLOS COMPUTATIONAL BIOLOGY*, VOL. 8, N.º 10, ART. E1002741, 25 DE OCTUBRE DE 2012.

Junto con Julia R. Gog, por entonces mi tutora de tesis doctoral en la Universidad de Cambridge, nos propusimos desentrañar ese enredo. Nos dimos cuenta de que si los individuos presentaban un riesgo determinado de contraer la gripe cada año, las probabilidades de entrar en contacto con dos cepas cualesquiera debían ser independientes entre sí. (En otras palabras, la exposición a la cepa A no influye en la probabilidad de ser infectado por la B.) Así pues, la probabilidad de que un individuo escogido al azar hubiera estado expuesto a una combinación concreta de infecciones podía calcularse multiplicando las probabilidades de exposición a cada una de las cepas de la combinación. Ello significaba que, en el caso de 20 cepas distintas, en lugar de enfrentarnos con un millón de posibilidades, solo tendríamos que manejar 20.

Pero cuando ejecutamos las ecuaciones, no obtuvimos los resultados esperados. El modelo indicaba una y otra vez que si una persona había estado expuesta siquiera a una sola cepa, tenía *más* probabilidades de haberlo estado a otra. Era como decir que ser alcanzado por un rayo aumentaba el riesgo de sufrir la gripe, una conclusión sin pies ni cabeza.

La razón de ese resultado absurdo era sencilla: no habíamos tenido en cuenta la edad. Suponiendo que las infecciones aparecen a un ritmo más o menos constante, cuantos más años cumple una persona, más probabilidades tiene de haber padecido como mínimo una. Así que si se escoge una persona al azar —pongamos una mujer— y sabemos que ha contraído la gripe (o ha sido alcanzada por un rayo), tendrá más posibilidades de ser mayor que joven. De lo cual deduciremos que tiene más posibilidades de haber sufrido otro percance, como pasar una segunda gripe causada por otra cepa.

Pero si tratamos cada grupo de edad por separado, el número de infecciones padecidas volverá a ser una variable independiente. Así que, para 20 cepas, ya no tendremos que controlar un millón de contingencias, sino de nuevo 20. Con ese modelo viable en las manos, comenzamos a hacer simulaciones de la evolución de la inmunidad contra la gripe a lo largo del tiempo.

El propósito consistía en generar datos artificiales que pudieran contrastarse con tendencias reales. Además de que el virus mutase con los años, supusimos que el riesgo de infección de cada franja de edad dependía del número de contactos sociales, los cuales se describían en las encuestas de población de individuos de la misma franja y de otras.

Pero incluso con esos cambios, nuestro modelo, que suponía que el descenso de la inmunidad en la mediana edad surgía a raíz del menor número de exposiciones, no podía reproducir el descenso que observábamos en la vida real. La predicción no era del todo incorrecta, ya que indicaba que los niños desarrollaban unas defensas más fuertes que los adultos. Pero en tanto que en el mundo real la menor concentración de anticuerpos parecía dar comienzo entre los 5 y 10 años de edad, en nuestro modelo tal declive ocurría entre los 15 y 20 años, es decir, una vez concluido el período escolar (tiempo en que se convive con muchas personas y gérmenes).



NO CONVIENE SUBESTIMAR LA GRIPE: En los años treinta del siglo xx hubo que levantar barracones temporales para atender el desbordante número de enfermos.

GETTY IMAGES

EL PECADO ORIGINAL

Mientras andaba intrigado con el patrón de edades de la gripe, hablé con varias personas sobre la dificultad de modelizar la inmunidad. En particular, con Andrea Graham, bióloga evolutiva de la Universidad de Princeton, que me inició en el concepto del pecado original antigénico. Ahora que contábamos con un modelo que podía manipular un gran número de cepas, me pregunté si incluir esa hipótesis serviría para generar resultados más realistas. Como la idea resultaba controvertida, también pensé si incorporarla serviría para comprobar su verosimilitud.

A semejanza del concepto bíblico, el pecado original antigénico es la historia del primer encuentro entre una entidad inocente, el sistema inmunitario, y una amenaza, el patógeno. En la versión inmunitaria, el cuerpo queda tan marcado por su primera victoria contra el virus de la gripe que cada infección posterior desencadena la producción de esos anticuerpos originales. El organismo los fabrica aunque detecte un conjunto de antígenos del patógeno ligeramente distinto, lo que exigiría emplear otros nuevos para combatir la infección con eficacia. Por otro lado, el cuerpo no logra suministrar suficientes anticuerpos frente a los antígenos modificados del patógeno; en lugar de ello, confía más en la respuesta inmunitaria contra los virus que ya conoce.

El virólogo Thomas Francis Jr. se dio cuenta de tal problema en 1947. Ese año, a pesar de la amplia campaña de vacunación del invierno anterior, algunos estudiantes de la Universidad de Michigan habían caído enfermos por una cepa gripal nueva pero afín. Cuando Francis comparó la inmunidad desatada contra el virus vacunal y contra el nuevo, comprobó que los estudiantes poseían anticuerpos que reconocían el primero pero no el que los había infectado un año después.

Francis concibió una explicación para esa curiosa observación. Planteó que, en lugar de generar anticuerpos contra cada virus nuevo, el sistema inmunitario reproduce la misma reacción contra patógenos similares que ya ha conocido. En otras palabras, las cepas pretéritas y el orden en que las personas las contraen podrían influir de modo notable en la capacidad de respuesta contra los futuros brotes del mutable virus de la gripe. Francis bautizó el fenómeno como el pecado original antigénico —quién sabe si, como el epidemiólogo David Morens y sus colaboradores sugirieron después, «por reverencia religiosa a la belleza de la ciencia o por un regocijo pícaro avivado por los vermuts a los que era tan aficionado».

En los años sesenta y setenta se hallaron más indicios de esa hipótesis en humanos y en otros animales. Pero desde entonces otros estudios la han puesto en tela de juicio. En 2008, un equipo de la Universidad Emory examinó las concentraciones de anticuerpos en voluntarios a quienes se había inyectado la vacuna antigripal y constató que su sistema inmunitario actuaba con eficacia contra la cepa vacunal. Se llegó a la conclusión de que el pecado original antigénico no parecía habitual en los adultos sanos vacunados. El año siguiente, sin embargo, otro grupo de la misma universidad encabezado por el inmunólogo Joshy Jacob halló que la infección desatada en ratones con virus vivos (en lugar de la versión inactivada de las vacunas) podía entorpecer las respuestas inmunitarias ulteriores contra otras cepas, lo que indicaba de nuevo que el pecado original antigénico podría desempeñar un papel importante en el curso de las infecciones naturales de la gripe.

Jacob y su grupo propusieron una explicación biológica para el pecado original antigénico y plantearon que podría tener su origen en la forma en que generamos los linfocitos B de memoria. Estas células, que forman parte de la respuesta inmunitaria, están programadas para reconocer una amenaza específica y fabricar anticuerpos que acaben con ella. Algunos linfocitos B persisten en el cuerpo después de la lucha, listos para lanzar más anticuerpos si vuelve a aparecer la misma amenaza. Según Jacob y sus colaboradores, la infección por virus vivos de la gripe haría entrar en acción a los linfocitos de memoria, en vez de activar la programación de nuevos linfocitos B. Supongamos que el año pasado padecimos la gripe y que este año contraemos un virus un poco distinto. Los linfocitos B de memoria ya conocen el virus del año anterior y pueden acabar con el nuevo intruso antes de que el organismo tenga tiempo de generar nuevos linfocitos B específicos contra él y, por tanto, que recuerden mejor la cepa del año corriente. Es como ese viejo dicho militar de que los generales siempre combaten como en la última guerra (especialmente los vencedores). Parece como si el sistema inmunitario confiara más en reforzar las viejas defensas que en organizar

otras nuevas, sobre todo si la antigua estrategia funciona razonablemente bien y con mayor rapidez.

En las últimas etapas de mi tesis doctoral adaptamos nuestro nuevo modelo para simular el pecado original antigénico. Esta vez, el declive característico de la inmunidad apareció en la simulación en el mismo momento que en la vida real, esto es, a partir de los siete años, una edad suficiente para haber contraído como mínimo una vez la gripe (en lugar de entre 15 y 20 años). De ahí en adelante, nuestro modelo indicaba que las infecciones previas alteraban la formación de anticuerpos eficaces. No está del todo claro lo que causa el aumento de la inmunidad en el grupo de edad avanzada. Podría ser fruto de las sucesivas vacunaciones a esa edad, o del hecho que se ha vivido tanto que los antígenos de cualquier nueva cepa gripal son tan distintos que el sistema inmunitario no los confunde con los virus de la infancia. Sea como sea, nuestros resultados sugieren que la curiosa distribución de la inmunidad según la edad entre las personas más jóvenes sería atribuible al pecado original antigénico y no al número de contactos sociales.

PUNTOS DÉBILES

Convencidos de que el pecado original antigénico podía conformar el perfil inmunitario de poblaciones enteras, quisimos investigar si las respuestas defensivas desacertadas podían influir también en la magnitud del brote epidémico. En las simulaciones comprobamos que, de vez en cuando, el modelo generaba grandes epidemias aunque el nuevo virus no fuera sustancialmente distinto de la cepa del año anterior. Parecía que el pecado original antigénico iba dejando lagunas en la inmunidad de ciertos grupos de edad: por mucho que los individuos hubieran estado expuestos a cepas que podrían haberlos protegido, su sistema inmunitario producía los anticuerpos «equivocados» contra la infección.

La mejor prueba histórica que avala esa idea se remonta a 1951, cuando la gripe se cebó con la ciudad de Liverpool en una ola más veloz y mortal que la infame pandemia de gripe española de 1918. Incluso las dos epidemias posteriores, acaecidas en 1957 y 1968, palidecen ante ella. Todavía hoy no se sabe con certeza la causa de su gran virulencia. La explicación más lógica es que la cepa de 1951 hubo de ser muy distinta a la del año anterior y que, por tanto, la mayoría de los enfermos no pudo montar una respuesta inmunitaria eficaz contra el virus. Pero no hay indicios sólidos de que la cepa de 1951 presentara diferencias notables con respecto a la del año anterior. Es más, la magnitud de la epidemia en el Reino Unido y en otros lugares varió en función de la localización. Algunas zonas sufrieron de pleno los estragos, como Gales e Inglaterra (especialmente Liverpool), mientras que en otras, como EE.UU., la mortalidad apenas varió respecto a años precedentes. El Reino Unido sufrió otras epidemias graves en 1990 y 2000, de nuevo sin pruebas de que el virus fuera muy distinto en esos años.

Sin embargo, nuestro modelo matemático puede recrear condiciones similares a las de los brotes de 1951, 1990 y 2000. Y cuando se supone que el pecado original antigénico existe, el orden en que un grupo de edad contrae las cepas gripales puede determinar con qué eficacia combatirán sus miembros las futuras infecciones. Dicho de otro modo, en lo que concierne a la gripe, cada ubicación geográfica podría tener su propio perfil inmunitario, con sutiles diferencias respecto a las vecinas, con sus propios y singulares puntos débiles de inmunidad. Los brotes graves como el de Liverpool tendrían su origen en esos puntos, que otras regiones sencillamente no poseerían por haber experimentado un pecado original antigénico distinto.

MODELOS PERFECCIONADOS

El estudio de la inmunidad antigripal se ha centrado a menudo en ciertos aspectos, como la eficacia de cierta vacuna o la magnitud de la epidemia en un año concreto. Pero ese tipo de problemas forman parte de una pregunta más amplia: ¿cómo aparece y se mantiene la inmunidad contra la gripe y contra otros virus cuya composición antigénica varía con el tiempo? ¿Puede servir esa información para entender la propagación y la evolución de la gripe?

Proyectos como el estudio FluScape en el sur de China están comenzando a abordar tal cuestión. Un análisis preliminar publicado en 2012 por Justin Lessler, de la Escuela de Salud Pública Bloomberg de la Universidad Johns Hopkins, y sus colaboradores indica que tal vez debería refinarse el concepto de pecado original antigénico. En su opinión, la inmunidad no vendría dictada exclusivamente por la primera cepa que infecta a una persona, sino que actuaría según una escala jerárquica. Plantean que la primera cepa ocuparía el lugar principal en la respuesta inmunitaria, la siguiente cepa generaría una respuesta un poco más débil y la tercera una respuesta aún menor. (Esta jerarquía por antigüedad se aplicaría únicamente a los virus muy variables, como el de la gripe.)

El estudio FluScape solo analiza muestras de sangre actuales, por lo que Lessler y sus colaboradores no pudieron examinar el cambio de las concentraciones de anticuerpos con el tiempo. En agosto de 2013, empero, investigadores de la Escuela de Medicina Icahn de Monte Sinaí analizaron una serie de muestras sanguíneas de 40 personas a lo largo de veinte años. Sus resultados avalan la idea de la antigüedad antigénica: cada nueva infección gripal relanza las concentraciones de anticuerpos contra las cepas de antaño, de modo que los individuos despliegan respuestas inmunitarias más potentes contra los virus que conocieron en los primeros años de vida que contra los posteriores.

A lo largo de los dos últimos años hemos colaborado con el equipo de FluScape para identificar pautas en los nuevos datos procedentes de China. Fruto de ese trabajo quizás se llegue a saber quién es sensible a ciertas cepas y cómo puede influir esa vulnerabilidad en la evolución de la enfermedad. Gracias a los nuevos modelos y a los datos más refinados estamos comenzando a averiguar el modo en que los individuos y las poblaciones generan inmunidad contra la gripe. Si el pasado sirve de algo, seguro que hallaremos más sorpresas por el camino.

PARA SABER MÁS

Original antigenic sin responses to influenza viruses. Jin Hyang Kim et al. en *Journal of Immunology*, vol. 183, n.º 5, págs. 3294-3301, septiembre de 2009.

Evidence for antigenic seniority in influenza a (H3N2) antibody responses in southern China. Justin Lessler et al. en *PLOS Pathogens*, vol. 8, n.º 7, art. e1002802, julio de 2012.

The role of social contacts and original antigenic sin in shaping the age pattern of immunity to seasonal influenza. Adam J. Kucharski y Julia R. Gog en *PLOS Computational Biology*, vol. 8, n.º 10, art. e1002741, octubre de 2012.

Neutralizing antibodies against previously encountered influenza virus strains increase over time: A longitudinal analysis. Matthew S. Miller et al. en *Science Translational Medicine*, vol. 5, n.º 198, art. 198ra107, agosto de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Fábricas de gripe. Helen Branswell en *IyC*, marzo de 2011.

Modelos de propagación de enfermedades. Joan Saldaña en *IyC*, octubre de 2013.



SOSTENIBILIDAD

Nuestro futuro dependerá de la capacidad para integrar los retos en



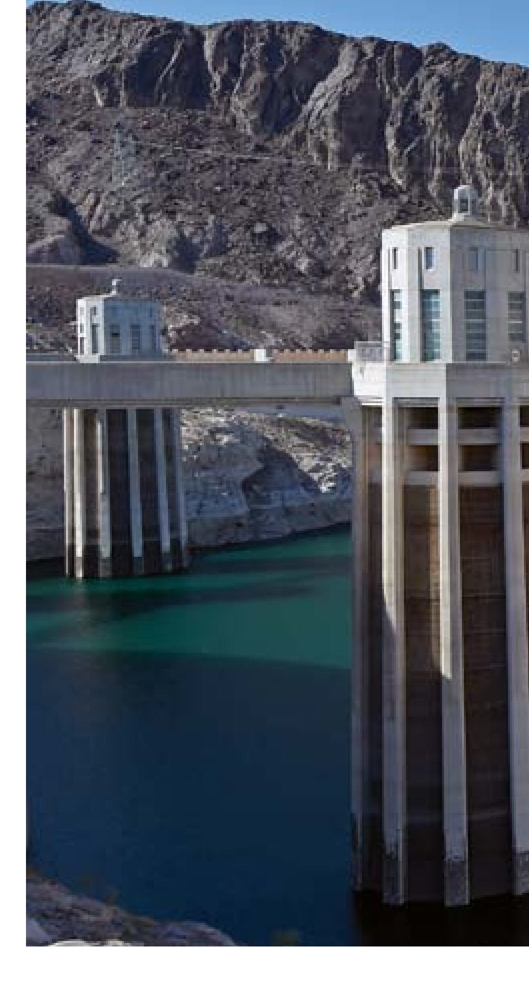
Un rompecabezas global

Michael E. Webber

DOMINIQUE BAYNES *(diseño)*; DAN SAELINGER *(fotografía)*



Michael E. Webber es director adjunto del Instituto de Energía de la Universidad de Texas en Austin. Su próximo libro, *Thirst for power*, donde analiza el consumo de energía y agua en el mundo actual, será publicado por Yale University Press.



En julio de 2012, el fallo de tres de las redes eléctricas regionales de la India produjo el mayor apagón de la historia de la humanidad. Más de 620 millones de personas (el 9 por ciento de la población mundial) se quedaron sin electricidad. La causa: problemas en la producción de alimentos debidos a la escasez de agua. Como consecuencia de una pertinaz sequía, los agricultores habían conectado un gran número de bombas para extraer aguas subterráneas cada vez más profundas. Bajo un sol abrasador, su consumo disparó la demanda de electricidad. A su vez, la falta de agua provocó que las centrales hidroeléctricas funcionasen peor de lo habitual.

Para agravar las cosas, las inundaciones de los meses anteriores habían hecho que el agua de escorrentía de las zonas de regadío depositase un gran volumen de sedimentos tras los muros de las presas, lo que redujo la capacidad de los pantanos. De pronto, una población mayor que toda la de Europa y dos veces superior a la de EE.UU. se quedó a oscuras.

En EE.UU., California se enfrenta a una combinación muy similar de problemas energéticos, hídricos y alimentarios. Debido a la reducción de la capa de nieve, a unas precipitaciones más escasas que nunca y al constante desarrollo en la cuenca del Colorado, en California central el caudal del río se ha reducido en un tercio. La región genera la mitad de la fruta, frutos secos y verdura del país, así como una cuarta parte de la leche. Los agricultores bombean aguas subterráneas a un rimo frenético; el verano pasado, algunas zonas extrajeron el doble de agua para regadío que el año anterior. El Valle Central, de unos 650 kilómetros de longitud, se hunde a medida que se explota el agua del subsuelo. Justo cuando más energía se necesitaba, la compañía eléctrica Southern California Edison cerró dos enormes reactores nucleares por falta de agua para refrigeración. Los planes de San Diego para construir una planta desalinizadora fueron impugnados por activistas, quienes alegaron que la infraestructura consumiría demasiada electricidad.

La energía, el agua y los alimentos constituyen nuestros tres recursos más fundamentales en todo el planeta. Y si bien este hecho es ampliamente reconocido por los responsables políticos, la interdependencia que liga estos tres bienes se encuentra considerablemente minusvalorada. Explotar demasiado cualquiera de ellos puede mermar los otros dos. Esa situación nos convierte en una sociedad mucho más frágil de lo que imaginamos. No estamos preparados para el desastre potencial que se avecina.

Aun así, tomamos decisiones trascendentales sobre centrales eléctricas, infraestructuras hídricas y tierras de cultivo que afectarán a las décadas venideras y que nos dejarán sumidos en un sistema vulnerable. Según la Agencia Internacional de Energía, tan solo satisfacer las necesidades energéticas del planeta requerirá invertir 48 billones de dólares entre el presente año y 2035. Y el director ejecutivo del organismo advirtió de que existía un riesgo real de enfocar mal esas inversiones, dado que los impactos no se están evaluando como es debido.

Resolver tales problemas requiere adoptar con urgencia una perspectiva integrada. No podemos seguir afrontando cada asunto por separado, sin relacionarlo con los demás. Un vasto número de áreas habitadas del planeta sufren sequía; los sistemas energéticos se topan con restricciones ambientales y con un aumento de los costes; además, la producción de alimentos

EN SÍNTESIS

El mundo está tratando de mejorar el suministro de energía, agua y alimentos de forma individual, pero tales desafíos deben afrontarse de manera integrada. Esa perspectiva también reportaría beneficios en cuestiones ambientales, pobreza, control de la población y enfermedades.

Desperdiciar menos comida permitiría ahorrar energía y agua. Las granjas urbanas podrían aprovechar el agua residual de las ciudades. Las turbinas eólicas en el desierto pueden convertir aguas salobres subterráneas en agua dulce. Y una red de suministros inteligente ahorraría energía y agua.

Los responsables de los sectores energético, hídrico y alimentario, así como los representantes políticos, han de dejar de pensar y actuar por separado. Deberían diseñarse planes que integrasen los retos en energía, agua y alimentación e implementasen mejoras técnicas en las infraestructuras.

ETHAN MILLER, GETTY IMAGES



EL LAGO MEAD, en Arizona y Nevada, tocó mínimos el pasado mes de julio, lo que amenazó con limitar el agua potable en Las Vegas, el riego de las granjas y la producción de electricidad en la presa Hoover.

deberá cubrir una demanda que crece a pasos agigantados. El nexo entre agua, energía y comida configura el telón de fondo de buena parte de las zonas más conflictivas del mundo. Los recientes disturbios en Libia y Siria fueron provocados por la sequía o por el elevado precio de los alimentos. Hemos de resolver este rompecabezas para crear una sociedad más integrada y resiliente. Pero ¿por dónde empezar?

CADENA DE RIESGOS... O DE RECOMPENSAS

El fallecido premio nóbel Richard Smalley, de la Universidad Rice, insinuó cómo comenzar en su ponencia de 2003 sobre «Los diez mayores problemas de la humanidad en los próximos 50 años». Por orden de importancia, su lista incluía energía, agua, comida, medio natural, pobreza, terrorismo y guerra, enfermedades, educación, democracia y población. Energía, agua y comida ocupaban los primeros puestos, ya que asegurar su abastecimiento ayudaría a combatir en cascada los problemas siguientes. Por ejemplo, disponer de multitud de recursos energéticos limpios, fiables y baratos nos permitiría disfrutar de abundante agua en condiciones higiénicas. El acceso a agua en buen estado y a energía (para fabricar abonos y hacer funcionar la maquinaria agrícola) permite producir alimentos. Y así sucesivamente.

La lista de Smalley era brillante, pero no contemplaba dos matices. Primero, el hecho de que energía, agua y alimentación se encuentran interrelacionadas. Y segundo, que, así como la riqueza de uno causa la abundancia de los otros, la escasez de cualquiera de ellos puede disparar la carencia de los demás.

Si la energía fuera infinita, podríamos obtener toda el agua que necesitáramos, ya que sería posible desalinizar océanos, excavar pozos profundos y transferir agua de un continente a otro. Con agua infinita no nos faltaría energía, pues podríamos construir enormes centrales hidroeléctricas o regar cultivos energéticos ilimitados. Con energía y agua infinitas haríamos florecer los desiertos y levantaríamos granjas interiores que rendirían alimentos todo el año.

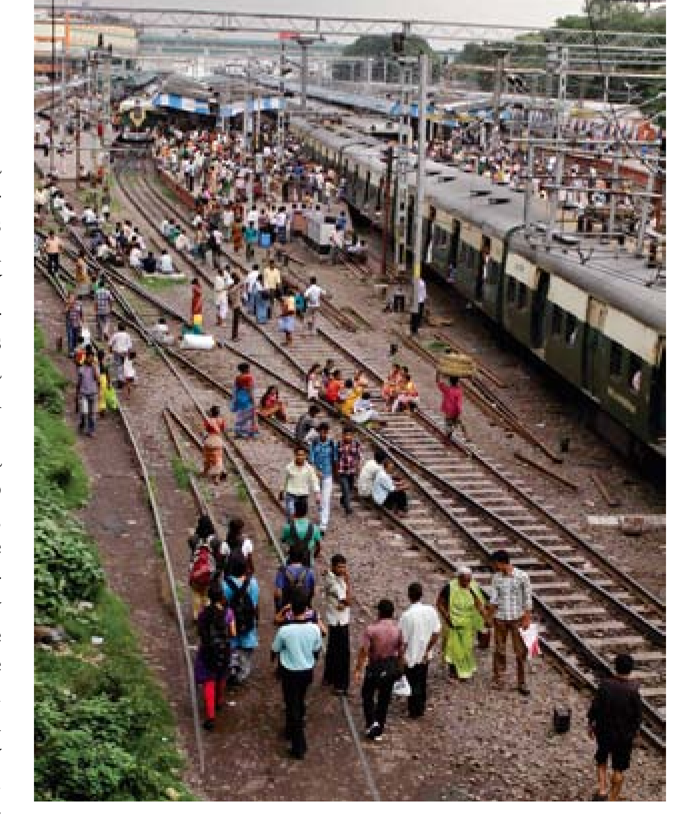
Por supuesto, no habitamos un mundo con recursos infinitos. Vivimos en un planeta con restricciones. Y las probabilidades de que esas limitaciones deriven en una concatenación de fracasos se incrementan a medida que la población crece, se amplía la esperanza de vida y aumenta el consumo.

El lago Mead, situado en las afueras de Las Vegas y alimentado por el río Colorado, se encuentra en la actualidad en el nivel más bajo de su historia. La ciudad extrae agua potable a través de dos enormes conductos que llegan hasta el lago. Pero, si el nivel continúa descendiendo, podría quedar por debajo de los conductos. Las grandes comunidades agrícolas situadas aguas abajo sufrirían escasez de agua, y las enormes turbinas hidroeléctricas de la presa Hoover, emplazada en el lago, suministrarían menos energía o incluso podrían dejar de generarla. Para Las Vegas, la solución pasa por invertir casi 1000 millones de dólares en un tercer conducto que acceda al lago desde abajo. Aunque quizá la medida no sirva de mucho: los expertos de la Institución Scripps de Oceanografía, en La Jolla, creen que el lago podría secarse hacia 2021 si el clima cambia según lo previsto y si las ciudades y granjas que dependen del río no limitan las extracciones de agua.

En Uruguay, los políticos se ven en la tesitura de decidir si usan el agua de sus reservas para beber, regar o generar electricidad. En 2008, las aguas del río Uruguay, represadas en la central de Salto Grande, descendieron hasta alcanzar cotas muy bajas.

La instalación dispone de casi la misma capacidad energética que la presa Hoover, pero solo tres de sus catorce turbinas giran, ya que la población local prefiere reservar el agua para las labores agrícolas y el uso municipal. Los ciudadanos se vieron obligados a elegir entre electricidad, comida o agua potable. Y aunque en Uruguay la situación haya mejorado, la misma coyuntura se repite en otras partes del mundo. Hace poco, algunas comunidades de Texas y Nuevo México afectadas por la sequía prohibieron o restringieron el uso de agua para fracturación hidráulica, pues preferían reservarla para fines agrícolas.

En torno al 80 por ciento del agua que consumimos se destina a la agricultura; es decir, a nuestra comida. Casi el 13 por cierto de la producción energética se utiliza en la búsqueda, limpieza, transporte, calentamiento, enfriamiento y vertido del agua que empleamos. Los abonos basados en gas natural, los plaguicidas derivados del petróleo y el diésel que impulsa tractores y cosechadoras elevan la factura energética de la producción de comida. Las industrias alimentarias que requieren sistemas de refrigeración, de elevadas necesidades energéticas, envuelven sus productos en plásticos derivados de petroquímicos. También consume energía adquirir los alimentos en el supermercado y cocinarlos en casa. El vínculo reviste una complejidad enorme. Y, en conjunto, el sistema resulta vulnerable a cualquier perturbación en uno de sus componentes.



PASAJEROS EN CALCUTA retenidos tras un gran apagón en 2012. El corte de electricidad se debió a los numerosos bombeos efectuados para regar las granjas durante la sequía.

BIKAS DAS, AP PHOTO

SOLUCIONES TÉCNICAS

Sería una temeridad construir nuevas centrales eléctricas y plantas de suministro y tratado de aguas siguiendo los diseños de siempre, continuar cultivando con métodos anticuados y extraer más petróleo y gas sin entender que todos esos objetivos se influyen unos a otros. Por fortuna, resulta posible integrar los tres aspectos de forma sostenible.

La medida más obvia consiste en generar menos desechos. En EE.UU., el 25 por ciento o más de la comida va a parar a la basura. Dado que producir alimentos exige una elevada cantidad de energía, desperdiciar menos ahorraría varios recursos a la vez. Para ello, bastaría con medidas tan sencillas como servir porciones menores o consumir menos carne, la cual necesita cuatro veces más energía que el cereal. También podemos transformar los restos de comida y agrícolas, como el estiércol, en gas natural por medio de digestores anaeróbicos: esferas metálicas en las que los microorganismos descomponen la materia orgánica y generan metano. Si la técnica se implantase en múltiples ámbitos —hogares, tiendas de alimentación y granjas— se obtendría energía, ingresos y, al mismo tiempo, se reduciría el consumo de agua y el coste energético de procesar la basura.

Otro subproducto aprovechable son las aguas residuales. En California, las ciudades de San Diego y Santa Clara ya están empleando aguas residuales tratadas para regar la tierra. El agua está incluso lo suficientemente limpia para beberla. Algo que, si las regulaciones del estado lo permitiesen, contribuiría al suministro de agua municipal.

Quienes abogan por levantar granjas urbanas, como Dickson Despommier, de la Universidad de Colorado, han diseñado «granjas verticales» para ser alojadas en rascacielos de cristal. Los neoyorquinos, por citar un ejemplo, producen cada día miles de millones de litros de aguas residuales. La ciudad gasta enormes sumas de dinero en limpiarla antes de verterla al río Hudson. Sin embargo, esa agua ya saneada podría irrigar granjas verticales y producir alimentos. Las sustancias sólidas extraídas de residuos líquidos suelen quemarse; pero, en su lugar, podrían incinerarse para generar electricidad destinada al edificio. Y, dado que la fruta y verdura fresca se producirían en el mismo lugar donde viven y trabajan los consumidores, la menor necesidad de transporte ahorraría energía y emisiones de carbono.

Varias empresas emergentes intentan utilizar el agua residual y el CO_2 procedente de las centrales eléctricas para cultivar algas junto a sus instalaciones. Los organismos consumirían el gas y el agua, y su cosecha permitiría producir biocombustible y alimento para ganado. Al extraer compuestos del agua y retirar CO_2 de la atmósfera, eso abordaría el cuarto punto de la lista de Smalley: la mejora del entorno.

Incluso el CO_2 podría aprovecharse para generar energía. Mis compañeros de la Universidad de Texas en Austin han diseñado un sistema en el que el CO_2 residual de las centrales eléctricas se inyecta en enormes reservas de salmuera emplazadas a gran profundidad. El gas queda retenido en el subsuelo, lo que no solo lo retira de la atmósfera, sino que fuerza el ascenso de metano caliente, el cual alcanza la superficie y puede usarse para producir energía.

Otra forma de atesorar varios recursos al mismo tiempo es el ahorro inteligente. Consumimos más agua al accionar interruptores y aparatos eléctricos que a través del grifo y la ducha, ya que se necesitan enormes cantidades de agua para refrigerar unas centrales eléctricas alejadas de nuestra vista y de nuestro pensamiento. Por otro lado, gastamos más energía en calentar, tratar y bombear agua que en iluminación. Apagar las luces y los aparatos eléctricos ahorra enormes cantidades de agua; cerrar los grifos ahorra grandes cantidades energía.

También podemos usar mejor esos bienes y producir alimentos en lugares inusuales. Las zonas desérticas del sudoeste de EE.UU. son muy ricas en aguas salobres situadas a poca profundidad. En la misma región abundan también el sol y el viento. Estas fuentes de energía suelen plantear problemas porque el sol no brilla por la noche y el viento sopla de manera intermitente. Sin embargo, podrían emplearse para desalinizar

el agua, ya que esta puede almacenarse con facilidad para su aprovechamiento posterior. La desalinización del agua marina consume grandes cantidades de energía, pero las aguas salobres contienen una cantidad de sal muy inferior. Nuestras investigaciones en la Universidad de Texas en Austin han puesto de manifiesto que el rendimiento económico de la energía eólica es mayor cuando se emplea para desalinizar agua salobre del subsuelo que para generar electricidad. Y, por supuesto, con el agua tratada pueden regarse los campos. En este caso, el vínculo entre los tres recursos juega a nuestro favor.

La misma línea de pensamiento podría mejorar la fracturación hidráulica. Un desafortunado efecto secundario de esta técnica se produce cuando el gas residual que asciende por el pozo, en su mayoría metano, se quema al salir al exterior. La combustión reviste tales dimensiones que las llamas pueden verse de noche desde el espacio. Los pozos también generan enormes cantidades de agua sucia, ya que los millones de litros de agua dulce que se inyectan en los pozos durante la fracturación regresan a la superficie cargados de sales y productos químicos. Si se procediese con ingenio, el metano podría aprovecharse para activar destiladores u otra maquinaria térmica capaz de limpiar el agua, lo que la haría reutilizable in situ. Eso ahorraría agua dulce, evitaría desperdiciar energía y reduciría las emisiones derivadas de la combustión.

El suministro de agua a hogares y negocios también puede llevarse a cabo de un modo más ingenioso. Colocar sensores en una red eléctrica inteligente lograría una distribución más eficiente de la energía. Con todo, peor aún es nuestro sistema de distribución de agua. Sus medidores obsoletos, de un siglo de antigüedad, no registran el consumo con exactitud. Según los expertos, las tuberías viejas pierden entre un 10 y 40 por ciento del agua tratada que transportan. Incorporar sensores inalámbricos al sistema de suministro ofrecería a los servicios públicos más herramientas para reducir las fugas. Una gestión del agua mejor planteada también ayudaría a los consumidores a administrar mejor su consumo.

Asimismo, podemos consumir alimentos de forma más provechosa. Una razón por la que se desperdicia tanta comida reside en que vendedores, restaurantes y consumidores se guían por la fecha de caducidad, una estimación muy grosera sobre el estado del producto. La comida caducada no se vende ni se consume, por más que se haya conservado en las condiciones correctas y siga en buen estado. Podrían usarse técnicas que evaluasen directamente el estado de los alimentos: por ejemplo, tintas en el empaquetado que cambiasen de color cuando el producto quedase expuesto a temperaturas inadecuadas o cuando comenzasen a proliferar microorganismos indeseados. Asimismo, otros sensores instalados en la cadena de distribución podrían medir los gases traza emitidos por la fruta y la verdura putrefacta. Los mismos dispositivos podrían derivar en controles de refrigeración más rigurosos, a fin de prevenir pérdidas.

VOLUNTAD POLÍTICA

A pesar de todas las soluciones técnicas disponibles, muy a menudo no las ponemos en práctica porque, ideológica y políticamente, no hemos acabado de entender la conexión entre energía, agua y comida. Por regla general, los responsables políticos, los empresarios y los ingenieros trabajan de manera independiente en un aspecto u otro.

Además, los problemas se agravan cuando las decisiones políticas, de supervisión y de financiación quedan a cargo de organismos independientes. Los responsables del sector energético dan por hecho que dispondrán de toda el agua que necesiten. Quienes están a cargo de los recursos hídricos suponen que contarán con toda la energía que deseen. Y aunque el sector de la alimentación sí reconoce los peligros de la sequía, reacciona bombeando más agua y perforando a mayor profundidad. La verdadera innovación provendrá de una visión holística de todos los recursos.

Ese planteamiento facilitaría una toma de decisiones más sabia. Por ejemplo, los responsables políticos podrían financiar la investigación de técnicas energéticas que no requieran tanta agua, métodos de gestión hídrica de bajo consumo energético, y sistemas de producción, almacenamiento y control de alimentos que prevengan las pérdidas, empleen menos agua y ahorren energía. Establecer unas normas de eficiencia de recursos interrelacionados mataría dos pájaros de un tiro. Desarrollar códigos también proporcionaría una potente herramienta para reducir los desperdicios y mejorar el rendimiento. La construcción de nuevas centrales energéticas debería ir acompañada de una evaluación de su huella hídrica, y viceversa. Además, los responsables políticos podrían establecer planes de préstamos rotatorios, inversiones directas de capital o beneficios fiscales para aquellas instituciones que integren dichas soluciones técnicas.

Un indicio alentador fue la declaración suscrita por 300 delegados de 33 países durante el congreso Nexus 2014 sobre agua, comida, clima y energía celebrado el año pasado en Chapel Hill, en Carolina del Norte. El documento, que no solo fue elaborado por representantes políticos, sino también por miembros del Banco Mundial y del Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible, reconocía que «el mundo es un solo sistema complejo» y que «las soluciones e intervenciones políticas deberían asegurar el beneficio del sistema en su conjunto».

Tal y como apuntaba Smalley, la energía puede actuar como motor de cambio. Debemos pensar en cómo aprovecharla para resolver múltiples retos a la vez. Las políticas monomaníacas centradas en reducir el CO_2 atmosférico, por ejemplo, pueden llevarnos a opciones energéticas con bajas emisiones de carbono pero muy intensivas en el uso de agua, como plantas nucleares o centrales de carbón con captura de carbono.

Por último, queda nuestra actitud personal. Pedir una ensalada que, en invierno, llega a nuestro plato después de haber recorrido 8000 kilómetros exige mantener un extenso sistema de distribución de elevado consumo energético. En general, nuestra tendencia a tener más de todo lleva los recursos al límite. El nexo entre energía, agua y comida plantea el problema más enojoso al que habrá de enfrentarse nuestro planeta. Citando al fallecido George Mitchell, padre de la técnica en invierno de fracturación hidráulica y abogado de la sostenibilidad: «Si no podemos resolver el problema para 7000 millones de personas, ¿qué haremos cuando seamos 9000 millones?».

PARA SABER MÁS

Liberation power: What do women need? Better energy. Sheril R. Kirshenbaum y Michael E. Webber en *Slate*. Publicado en línea el 4 de noviembre de 2013.

The ocean under our feet. Michael E. Webber en *Mechanical Engineering*, pág. 16, enero 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Agricultura vertical. Dickson Despommier en *IyC*, septiembre de 2010.

Una solución integral al carbono. Steven L. Bryant en *IyC*, enero de 2014.

Reutilización de aguas residuales. Olive Heffernan en *IyC*, septiembre de 2014.

por Marc Boada Ferrer

Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



Microsiderurgia

Obtener hierro a partir de sus minerales es una tarea realmente difícil; de ahí que se hable de la barrera, o muro, del hierro. Por suerte, varios siglos de experimentación metalúrgica han superado los obstáculos técnicos

El hierro, así como sus derivados (acero, aceros especiales, entre ellos los inoxidables), es el metal estrella de nuestra civilización. Lógico. Es abundante, tenaz y puede experimentar todo tipo de transformaciones. Además, es barato: podemos comprar hierro por un euro el kilo. Y precisamente por su aparente baratura, este extraordinario elemento tiene hoy fama de vulgar y ordinario. Que el hierro se haya convertido en un metal tan popular y accesible se debe en parte a la industria siderúrgica, que en estos últimos dos siglos lo ha fabricado a un precio casi irrisorio. Una industria potentísima con un gran componente científico-técnico que ha dado uno de los mayores frutos de la inventiva humana: el horno alto.

En esta ocasión, intentaremos construir algo parecido. Y para ello aprovecharemos el vasto corpus de conocimiento que han creado los coleccionistas de elementos químicos, arqueólogos experimentales, aficionados a la cuchillería y todos los forjadores de los últimos tres milenios que han luchado denodadamente para obtener el útil metal. En este sentido, debo enorme gratitud a Miquel Segura, hábil forjador que me inició en las artes del acero y su obtención, y que me mostró algunos de los secretos técnicos que hoy traemos a estas páginas. Constituyen una revisión de las técnicas tradicionales, como el método catalán [*véase* «La farga catalana», por Pedro Molera; Investigación y Ciencia, octubre de 1982], el corso

MARC BOADA

COMO LAVA VOLCÁNICA, la escoria sangra por la bigotera del horno. Con ella se eliminan impurezas, gangas y fundentes.

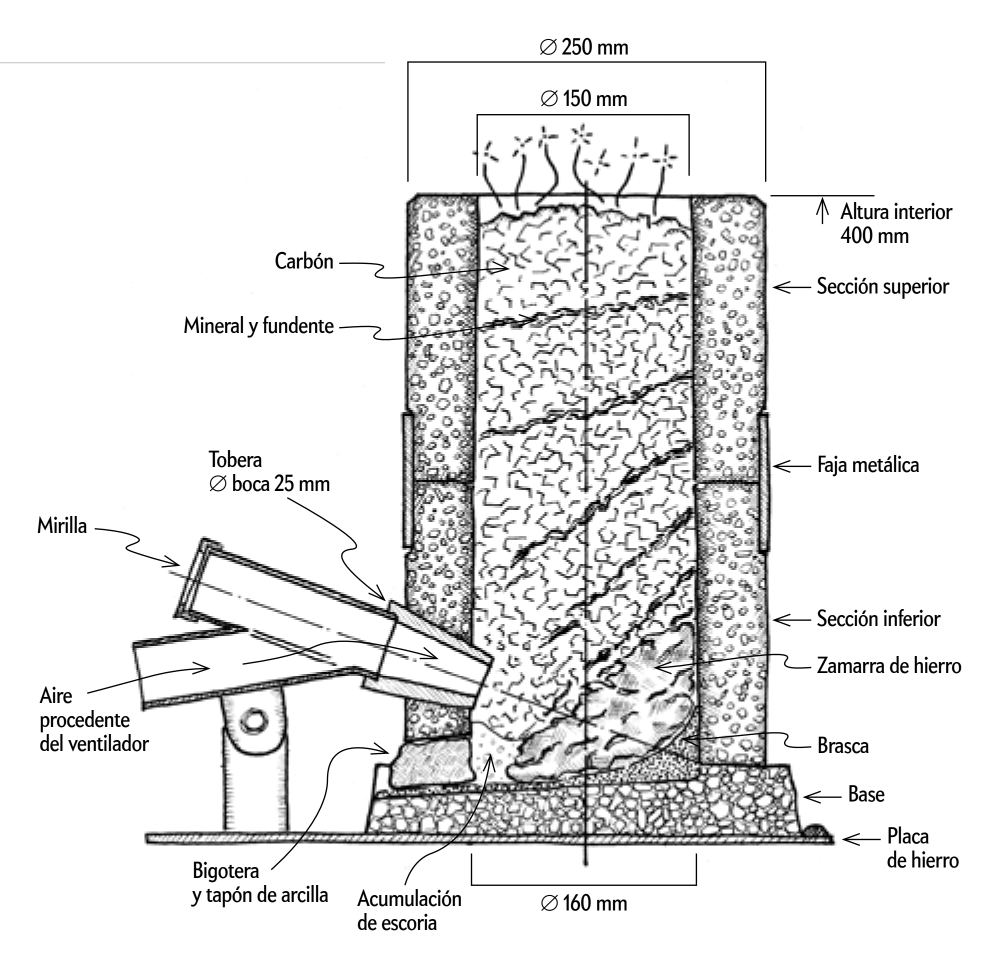
o el de las ferrerías vascas, y su objetivo no es obtener el hierro líquido y carburado del horno alto, sino una esponja de metal más puro y directamente forjable.

Para empezar, deberemos localizar algunos kilos de mena de hierro. La magnetita resulta óptima, ya que su rendimiento en metal es el mayor posible y la concentración magnética permite un gran enriquecimiento [*véase* «Minería artesanal», por Marc Boada Ferrer; Investigación y Ciencia, mayo de 2013]. Pero también son adecuados la hematita, u oligisto, la goethita y la siderita. En mi caso aprovecho la limonita de una mina abandonada.

Sea cual fuere el mineral de partida, vale la pena someterlo a un calcinado previo. Encenderemos un fuego abierto y bien aireado, y sobre las brasas pondremos el mineral en trozos del tamaño de un huevo. Esta calcinación servirá para evaporar el agua presente y volatilizar minerales indeseables; también aumentará la porosidad, lo que facilitará la reducción. (Obsta decir que tomaremos todas las precauciones para no inhalar los gases que se liberan). No debemos tener miedo a un fuego intenso; incluso con una incipiente fusión de la mena, la reducción a metal será fácil y posible. Una vez enfriado, lo quebrantaremos hasta reducir los fragmentos mayores a un tamaño de diez o quince milímetros. Luego lo tamizaremos para eliminar el polvo y la arenilla producida.

Pasemos ahora al combustible. Podemos escoger entre carbón vegetal o el moderno carbón metalúrgico, el cok o coque. Ambos se producen por la pirólisis de otros compuestos de carbono. El primero se obtiene de la madera, que se quema con déficit de oxígeno. Con el segundo sucede exactamente lo mismo, solo que este se fabrica a partir de distintos carbones minerales; se consigue así un carbón exento de breas e hidrocarburos, el coque, a la vez que se reduce su contenido en azufre, perjudicial en combinación con el hierro. Todo alto horno necesita siempre de una planta de coquización y nosotros no vamos a ser menos.

El experimentador siderúrgico debe valorar la fabricación de su propio combustible, ya que la obtención de carbón vegetal sin duda goza de grandes ventajas, además de las económicas [*véase* «Las artes del carbonero», por Marc Boada Ferrer; Investigación y Ciencia, febrero de 2014]. Con independencia de su procedencia, lo fragmentaremos en trozos de 10 o 15 milímetros como máximo y lo tamizaremos para eliminar el polvo y las fracciones de pocos milímetros.



MARC BOADA

Observemos ahora el diseño del horno, que es engañosamente simple y recuerda de lejos a un pequeño horno de cubilote. Consiste en una chimenea cilíndrica, o ligeramente cónica, cerrada por abajo. Muy cerca de la base se abren uno o varios agujeros por donde se inyecta aire, que avivará la combustión del carbón que se aporta, lo mismo que el mineral, por la boca superior. Por abajo inyectaremos el oxígeno atmosférico. Este quema: los gases reaccionan con los óxidos de hierro y bien calientes ascienden hasta salir por la chimenea. Todo ello ocurre gracias al calor generado por la combustión del carbón que desempeña un doble papel: aporta la energía calorífica necesaria y produce monóxido de carbono que reduce los óxidos de hierro. Hablamos, pues, de un reactor a contracorriente donde sucede un fenómeno de reducción.

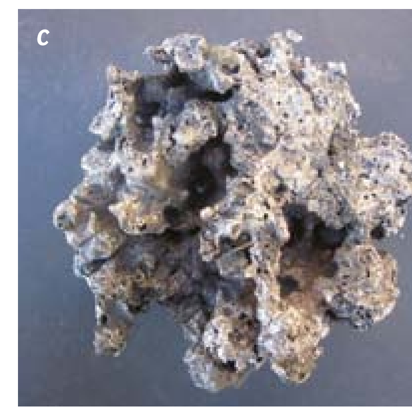
Cuanta más alta sea la temperatura, con mayor facilidad ocurrirán esas reacciones y, por tanto, mayor será el estrés mecánico, térmico y químico que deberán soportar las paredes del horno. La industria ha solucionado este problema mediante un amplísimo abanico de materiales refractarios, capaces de resistir temperaturas extremas. Pero ¿cómo resolvieron este reto los íberos o los romanos, que ya gozaban de cierta producción de derivados siderúrgicos? Seguramente el material utilizado hace siglos era la arcilla. Mezclada con cenizas, carbón en polvo, paja o, mejor aún, estiércol de caballo, se torna más refractaria y su parte vegetal aporta cohesión y facilidad para el moldeo.

Más indicados todavía son la arcilla refractaria del mercado o el hormigón usado para la construcción de chimeneas. Sin embargo, estos materiales fundirán con toda seguridad cuando el horno llegue a su temperatura máxima. En efecto, los hornos hechos con productos baratos duran muy poco, a veces una sola reducción. Así que será mejor fabricarlos con la mayor simplicidad posible.

Quizá lo más fácil es construir un horno por secciones monolíticas, es decir, hacer un molde y de él sacar diversas piezas que, puestas una sobre otra, configuren el reactor. Buscaremos un tubo de cartón o PVC, de las dimensiones de la cuba del horno, y sobre este moldearemos sus paredes dejando en la pieza que será la inferior dos agujeros: uno por donde entrará el aire (tobera) y otro por donde extraeremos la escoria (bigotera). Cabe tener en cuenta que, aunque modifiquemos las dimensio-







MARC BOADA

nes, debemos conservar las proporciones. Como diría un físico, la razón de aspecto de nuestro reactor es importante si lo que queremos es una buena repetitividad del proceso. La proporción óptima entre el diámetro de la cuba ante la tobera y la altura es de 1:2,5 —al menos en los modelos que he ensayado.

Si usamos mortero refractario, solo debemos hacer un molde en negativo del núcleo del reactor, con un encofrado exterior, y verterlo perfectamente amasado. El resultado es espectacular y muy durable, sobre todo si embebemos en el mortero una malla metálica electrosoldada de 10 milímetros de luz. Decíamos que raramente los materiales comunes soportan las altas temperaturas del horno, que rondan los 1500 ºC; ello es así, no solo por la propia degradación térmica, sino también porque reaccionan químicamente con el mineral, los gases de combustión y los fundentes.

Un célebre metalúrgico dijo una vez que para fabricar un buen metal primero hay que obtener una buena escoria. Es bien cierto. Todos los minerales son impuros: incorporan una ganga que dificulta mucho la reducción del metal. A menudo esta ganga es silícea; a veces calcárea. Los fundentes son aditivos que se añaden a la carga para escorificar la ganga, convirtiéndola en un producto fluido, como si de lava volcánica se tratara; así la podemos sangrar fácilmente por la bigotera. El fundente más utilizado es la roca calcárea. Le siguen la arcilla, la fluorita, el bórax o el carbonato sódico, que obra milagros. La caliza (carbonato cálcico) y el carbonato sódico son compuestos básicos, que se combinan con la ganga silícea más ácida haciéndola fusible —en realidad estamos fabricando algo muy parecido al vidrio—. Por otro lado, su papel es también el de un afinante, ya que secuestra elementos y compuestos indeseables. Además, los óxidos de hierro también participan en la reacción, se disuelven y combinan, y reducen aún más la temperatura de fusión de la escoria formada.

Así pues, nos aprovisionaremos de caliza, bórax y carbonato sódico con los que, con el reactor en marcha, ensayaremos el comportamiento químico de la mena y del propio horno. Resultado: a base de funcionar, el horno adelgaza sus paredes hasta que se perfora. Lo podemos solucionar de dos formas: o compramos morteros especiales, capaces de soportar hasta 1600 ºC —con lo que el gasto se dispara—, o ensayamos nuestros propios recubrimientos refractarios, que, aplicados sobre el interior del horno, harán de barrera protectora.

He comprobado la eficacia de mezclas de esmeril (alúmina de origen natural) de grano fino, por ejemplo 400, con pequeñas cantidades de distintas arcillas. También funciona una mezcla a base de otro subproducto de nuestra caldera de carbón vegetal. En efecto, de los humos de la carbonera podemos condensar un líquido negro, viscoso, tóxico y de olor repugnante, la brea. Una mezcla de esta, perfectamente deshidratada, con polvo de grafito nos dará una pasta que aplicaremos y coceremos lentísimamente in situ. Observaremos que estos recubrimientos tienen un carácter neutro, son anfóteros y, por tanto, pueden resistir con mayor facilidad todo tipo de compuestos en la escoria.

Hecho todo lo anterior habrá llegado el momento de pensar en la inyección de aire. Al moldear el horno hemos dejado un agujero inclinado en el que ajustaremos lo que será la tobera. Se trata de un detalle crítico. Debe hallarse inclinada unos 20 grados. Además, su sección debe tener un cierto tamaño. En este caso, daremos a la boca de la tobera un diámetro de 25 o 30 milímetros. Lo ideal sería fundirla en cobre, mecanizarla con grafito sinterizado o moldearla con una arcilla realmente refractaria (a base de circonia o alúmina, por ejemplo), pero siempre nos podemos contentar con un simple retal de tubo de acero inoxidable refractario bien grueso. A esta tobera y mediante tubos metálicos acoplaremos una pequeña turbina (servirán un secador de pelo o una pistola de aire caliente). Es importante prever una derivación por la que podamos regular la presión del viento.

Procedamos por fin al encendido de nuestro reactor siderúrgico. Recubriremos el fondo con una capa generosa de arcilla húmeda mezclada con mucho carbón en polvo, la brasca. Sobre esta encenderemos fuego, con astillas y algunos carbones menudos. El tiraje será natural, ya que tanto la tobera como la bigotera permanecerán aún abiertas. Cuando el fuego tome cierta entidad, aportaremos más carbón menudo y sellaremos la bigotera con un tapón de arcilla. Luego conectaremos el tubo del viento a la tobera, garantizando una unión segura y estable, incapaz de fallar a media maniobra. Daremos un poco de aire y lentamente aportaremos más combustible hasta llegar a la boca del horno. Esperaremos un rato para que el conjunto se caliente de manera uniforme. En ese punto, aumentaremos el flujo de aire y lo regularemos hasta que la columna de carbón descienda cerca de un centímetro por minuto, poco más o menos.

A partir de ese momento, empezaremos con las aportaciones de carbón, manteniendo constante su altura. Es tradición que el mineral mezclado con los fundentes se cargue a intervalos regulares, interponiendo capas de carbón. Tras un buen número de ensayos, he determinado que el ritmo de carga es de unos 200 gramos de mineral cada diez o doce minutos, a veces algo menos. A estos doscientos gramos sumo 50 de cal y 25 de carbonato sódico.





TRANSFORMACIONES CASI ALQUIMICAS: En el proceso siderúrgico, la limonita terrosa y de color ocre (*a*) muta, tras su tostado, a un vivo rojizo (*b*). Más tarde, en el horno, se convierte en una esponja metálica, el *masser* o zamarra (*c*), que, una vez forjado y compactado, rinde un bello botón de hierro (*d*). Durante el proceso se obtiene también una abundante escoria vítrea (*e*), que se lleva las impurezas.

Además, resulta idóneo incorporar también 25 o 30 gramos de restos metálicos procedentes de reducciones anteriores. Si el carbón es poco calorífico o quema con dificultad, debemos reducir la carga a unos 150 gramos de mineral y las partes proporcionales de fundentes y chatarra.

Una buena norma memorística es que la superficie en centímetros ante la tobera es equivalente a la carga del mineral en gramos, siempre que el funcionamiento del horno sea el correcto. Pero ¿cómo podemos conocer estos parámetros? Pues haciendo al principio aportaciones de prueba. En efecto, una vez hemos encontrado el ritmo adecuado (ese descenso de la carga próximo a un centímetro por minuto), en vez de comenzar por aportar mineral podemos poner solo escoria de operaciones anteriores o, en su defecto, cualquier vidrio machacado. En un ejemplo real ello significa que en la primera media hora ponemos tres o cuatro cargas de unos doscientos gramos de esas escorias o vidrio. De funcionar correctamente, deberíamos extraer los líquidos por la base al cabo de unos 30 o 40 minutos como máximo.

A esa operación se le llama sangrado y ofrece sin duda un espectáculo de especial belleza. Visualicemos el fenómeno. El horno lleva ya un rato en marcha. Por su boca escapa una llama bien visible y podemos percibir el rugido de la combustión. Cuando la escoria líquida desciende y pasa ante la tobera, interrumpe el paso de aire, entrando en una zona turbulenta. Allí, la temperatura es tan alta que permanece líquida, gotea y burbujea, produciendo un sonido característico, algo parecido al flamear de una bandera. Ha llegado el momento de sangrar por la bigotera. Con una barra de hierro aguzada nos abriremos paso a través del tapón de arcilla. Debemos tomar precauciones porque, al retirarlo, la escoria fluirá a borbotones, al rojo vivo, límpida y fluida si todo va bien, espesa y grumosa si la temperatura es baja o los fundentes son inapropiados para nuestro mineral. De ahí que en esta prueba previa utilicemos productos de fusibilidad garantizada, como el vidrio común.

De conseguirlo, empezaremos inmediatamente, ahora sí, a cargar mena y fundentes. Anotaremos el peso de todo, combustible y cargas. Estas, como decíamos, serán regularmente introducidas y, de vez en cuando, mediante la barra de hierro y por la boca del horno, comprobaremos que descienden sin dejar huecos interiores. Dos son los principales problemas que sin duda se presentarán. El primero es la obturación de la tobera por una escoria poco fluida, una temperatura demasiado baja o una carga excesiva. Lo resolveremos extrayendo el tubo del aire y limpiando la tobera con un escoplo, si es necesario con la ayuda de un martillo. El segundo es peor y consiste en la obturación de la propia cuba. Las causas son las mismas pero la resolución ya es más difícil. Lo mejor es abrir el horno en caliente, es decir, al rojo vivo. Levantaremos sección por sección y extraeremos con la barra de hierro todo lo que pueda haber de sólido en su interior. Luego volveremos a empezar cambiando lo que fuere, ya sea una mayor presión del aire o una mayor granulometría del mineral y del carbón que facilite la ventilación. También podemos añadir una proporción mayor de fundentes o buscar una mena más fusible.

Proseguiremos aportando mineral y carbón, y, de vez en cuando (cada dos o tres cargas), sangraremos la escoria. Tres o cuatro horas más tarde habremos introducido unos cuatro kilos de mena, con lo que dentro del horno se habrá formado un régulo de casi un kilo, denominado *masser* o zamarra. Este bloque esponjoso crece poco a poco ante la tobera hasta llegar a un tamaño que compromete el funcionamiento normal del horno. En ese momento, la zona de combustión se reduce. El *masser* refleja el calor y la pared del horno se funde, como mínimo alrededor de la tobera. Habrá llegado el momento de cesar toda carga y dejar que la columna baje. A medida que lo haga, retiraremos secciones del horno y con una barra de hierro o una tenazas no menos extensas intentaremos despegar la esponja, girándola para que se iguale su temperatura.

Cuando la esponja ya sea casi visible entre las brasas al blanco, desmontaremos la última sección, que tumbaremos sobre el suelo, extrayendo por fin el tan preciado metal. Lo óptimo pasa por tener, justo al lado, una fragua. Llevaremos allí el *masser*, lo caldearemos de nuevo hasta el rojo blanco y empezaremos un lento proceso de forja, compactando el material, de forma que este escupa las inclusiones de escoria. Se romperá en trozos, es inevitable. Pero los de mayor tamaño acabarán formando una bola sólida, especialmente si espolvoreamos sobre este bórax o arena silícea, que limpiarán y desoxidarán las superficies, facilitando su soldadura.

El hierro obtenido será libre de impurezas y de gran calidad, tal y como pasaba hace siglos. Pero para su uso práctico será necesario endurecerlo, añadir un pequeño porcentaje de carbono que lo convierta en auténtico acero. De nuevo, la carbonera será nuestra aliada. Una vez forjado aquello que deseemos, lo colocaremos en el interior de esta, junto con la madera que queremos carbonizar. Allí, en un ambiente riquísimo en monóxido de carbono, sobre los leños hechos ascuas a más de setecientos grados centígrados, el carbono se difundirá en el hierro, endureciendo su superficie y conservando un núcleo más bajo en carbono (dulce). Repetidas inmersiones en ese infierno acabarán por rendir un material extraordinario, el acero que posibilita nuestra civilización.

por Agustín Rayo



Agustín Rayo es catedrático de filosofía en el Instituto de Tecnología de Massachusetts y catedrático asociado en la Universidad de Oslo. Es autor de *The construction of logical space* (Oxford University Press, 2013).

Criptografía segura

Habiendo códigos imposibles de descifrar con un ordenador, ¿por qué corremos riesgos criptográficos?

Todos sabemos que un método criptográfico puede ser inseguro. En un episodio histórico hoy famoso, Alan Turing y su equipo de criptoanalistas de Bletchley Park descifraron los códigos de las máquinas nazis Enigma y Lorenz: una hazaña que otorgó a los Aliados una ventaja decisiva durante la Segunda Guerra Mundial.

Algo menos conocido es que existen métodos criptográficos absolutamente seguros, al menos desde un punto de vista informático. A continuación veremos en qué consisten tales códigos y consideraremos la pregunta de por qué, a pesar de todo, continuamos usando métodos criptográficos vulnerables.

Códigos impenetrables

La base de un código imposible de descifrar con una computadora reside en un generador de números aleatorios.

Supongamos que usted y yo disponemos de tal dispositivo y que lo empleamos para generar una secuencia aleatoria de unos y ceros. Dicha secuencia será nuestra «clave». A modo de ejemplo, pongamos por caso que los 30 primeros dígitos de nuestra clave vienen dados por la siguiente secuencia:

0100000001110110110010000010010...

Una vez obtenida, cada uno de nosotros conservará una copia de la clave y no la compartirá con nadie más. Ahora podremos intercambiar mensajes seguros si seguimos estos cinco pasos:

Paso 1: Con independencia de cuál sea nuestra clave, fijamos un procedimiento para asignar a cada letra del alfabeto una secuencia diferente de unos y ceros. La tabla que reproducimos en la página siguiente proporciona un ejemplo. (Nótese que el método empleado aquí nos permite representar cada letra sin ambigüedad, ya que existen 32 quintetos distintos de ceros y unos, cada uno de los cuales corresponde a uno de 32 caracteres: 27 letras y 5 signos de puntuación.)

Paso 2: Supongamos ahora que soy yo quien envía el mensaje y usted quien lo recibe. Si me propongo transmitir la palabra *jueves*, comenzaré usando la tabla para obtener la siguiente secuencia de ceros y unos:

```
01001  10101  00100  10110  00100  10011
 [J]    [U]    [E]    [V]    [E]    [S]
```

Llamaremos a esta secuencia «texto plano».

En cierto sentido, el texto plano ya nos proporciona una versión cifrada del mensaje. Sin embargo, se trata de una muy insegura, ya que si el mensaje original contiene letras repetidas, el texto plano repetirá quintetos de ceros y unos en las posiciones correspondientes.

Ello supone una vulnerabilidad enorme. Un método clásico para descifrar esta clase de códigos consiste en usar la frecuencia característica con que aparece cada letra en un idioma. En español, por ejemplo, la E aparece más del 12 por ciento de las veces, mientras que la J solo lo hace en torno a un 0,5 por ciento. Así, un enemigo que interceptase nuestro texto podría concluir que es mucho más probable que la secuencia 00100 corresponda a la E que a la J. (Y, en este caso, ¡tendría razón!)

Por tanto, si un adversario intercepta un gran número de mensajes —o uno lo suficientemente largo—, siempre podrá usar la información sobre las frecuencias características de las letras en castellano para elaborar hipótesis plausibles sobre qué secuencia de dígitos corresponde a cada una.

Paso 3: Ha llegado el momento de emplear nuestra clave secreta para transformar el texto plano en uno verdaderamente cifrado. Para ello, basta con sumar la clave y el texto plano. En otras palabras, el enésimo dígito del texto cifrado se obtiene al sumar el enésimo dígito del texto plano y el enésimo dígito de la clave (donde la suma debe efectuarse en binario, de modo que 1 + 1 = 0).

En nuestro ejemplo, el texto cifrado se generaría como sigue:

```
 01001 10101 00100 10110 00100 10011
+01000 00011 10110 11001 00000 10010
 -----------------------------------
 00001 10110 10010 01111 00100 00001
```

Paso 4: Ahora que he generado una versión cifrada del mensaje, estoy en posición de transmitírselo a usted. No hay problema en que la transmisión sea pública: podría gritar el mensaje cifrado a los cuatro vientos, de ser necesario. Como veremos más adelante, ningún procedimiento informático es capaz de recuperar el texto plano a partir del cifrado.



THINKSTOCK/SNAKE3D

Paso 5: Una vez que usted reciba el texto cifrado, podrá obtener el texto plano sumándole la clave:

```
 00001 10110 10010 01111 00100 00001
+01000 00011 10110 11001 00000 10010
 ------------------------------------
 01001 10101 00100 10110 00100 10011
```

Con el texto plano en su poder, bastará con emplear la tabla para recuperar el mensaje original: *jueves*.

A 00000	B 00001	C 00010	D 00011	E 00100	F 00101	G 00110	H 00111
I 01000	J 01001	K 01010	L 01011	M 01100	N 01101	Ñ 01110	O 01111
P 10000	Q 10001	R 10010	S 10011	T 10100	U 10101	V 10110	W 10111
X 11000	Y 11001	Z 11010	. 11011	, 11100	- 11101	¿ 11110	? 11111

TABLA para convertir mensajes ordinarios en textos planos binarios.

Claves secretas y seguridad

Ahora imagine que un enemigo ha interceptado el texto cifrado y que, además, sabe que ha sido generado con el método que acabamos de describir. ¿Podría hacer algo al respecto?

Por fortuna, no. El texto cifrado no proporciona ninguna información acerca del texto plano (excepto su longitud). Para ver por qué, consideremos los cinco primeros cinco dígitos del texto cifrado: 00001. La probabilidad de que esta secuencia haya sido generada a partir de una J, una E o cualquier otra letra o signo de puntuación es la misma.

Ello se debe a que, siempre que la clave haya sido obtenida por medios genuinamente aleatorios, la probabilidad de que sus primeros cinco dígitos conformen una secuencia dada será exactamente igual a la de que conformen cualquier otra. Por tanto, la probabilidad de que los cinco primeros dígitos del texto cifrado procedan de una M resultará idéntica a la probabilidad de que provengan de cualquier otra letra. Lo mismo se aplica al texto completo, por lo que este no da ninguna información sobre el mensaje original. En particular, este método resulta inmune a los análisis de frecuencias características que mencionábamos arriba.

Es importante señalar que, aun cuando nuestro método resulte inquebrantable desde un punto de vista informático, siempre estará expuesto a otro tipo de vulnerabilidades. Por ejemplo, nuestro adversario podría contratar a un espía para robarnos la clave secreta.

El enemigo podría también aprovechar nuestra falta de disciplina. Supongamos que cometemos el error —imperdonable en círculos criptográficos— de transmitir dos textos que han sido cifrados con la misma clave. Si nuestro adversario los intercepta, podría obtener información muy relevante sobre los respectivos textos planos.

Ello se debe a que, si P_1 y P_2 denotan los textos planos, C_1 y C_2 los textos cifrados, y K la clave común, nuestro método garantiza que:

$$C_1 + C_2 = (P_1 + K) + (P_2 + K) = (P_1 + P_2) + (K + K) = P_1 + P_2 .$$

Por tanto, si nuestro adversario calcula la suma de C_1 y C_2, conocerá la suma de P_1 y P_2. Este fue el procedimiento que empleó John Tiltman, criptógrafo de Bletchley Park, para descifrar el método Lorenz, usado por Hitler para comunicarse con el mando más alto de sus ejércitos. Tiltman tuvo la suerte de que un operador nazi transmitió mensajes cifrados similares utilizando la misma clave: un error monumental que cambió el curso de la Segunda Guerra Mundial.

Claves públicas

Así pues, siempre que las claves secretas permanezcan protegidas y los operadores mantengan un mínimo de disciplina, podremos transmitir mensajes cifrados con total seguridad. Sin embargo, en la actualidad seguimos usando métodos falibles. ¿Por qué?

Hace años, había una razón de peso para ello: los métodos criptográficos seguros no eran nada prácticos. Imagine que usted es el capitán de un submarino durante la Segunda Guerra Mundial y que debe pasar cinco años en alta mar. En promedio, usted y sus superiores intercambian ocho mensajes al día, cada uno de los cuales contiene unas 2000 letras. Para cifrar y descifrar esos mensajes con el método descrito arriba, haría falta una clave de 146 millones de dígitos: el equivalente a unas 30 ediciones estándar de la Biblia.

Con las técnicas propias la Segunda Guerra Mundial, trabajar con una clave de semejante longitud resultaría muy poco práctico. Además, existiría una probabilidad muy alta de cometer errores. Por esa razón, los nazis se vieron obligados a desarrollar máquinas criptográficas como Enigma y Lorenz, a pesar de que generaban códigos inseguros —aunque, por supuesto, el régimen nazi confiaba en que resultarían inquebrantables en la práctica.

Sin embargo, con la ayuda de un ordenador, disponer de una clave de cientos de millones de dígitos no presenta obstáculo alguno. Hoy en día, un lápiz de memoria USB puede almacenar fácilmente en torno a un billón de dígitos, lo suficiente para intercambiar mensajes durante decenas de miles de años.

Si esto es así, ¿por qué no utilizamos todos métodos criptográficos informáticamente impenetrables? El problema principal se debe a que no suele haber un método práctico para compartir claves secretas con nuestros corresponsales. Si usted quiere comprar un par de zapatos por Internet y desea transmitir al vendedor el número de su tarjeta de crédito, ¿cómo podrían compartir una clave segura?

A menos que usted y el zapatero estén dispuestos a reunirse en secreto para intercambiar un lápiz de memoria USB, la única solución pasa por emplear métodos criptográficos de clave pública. Los sitios de Internet que emplean este procedimiento generan dos claves: una privada y otra pública. La primera permanece secreta, pero la segunda puede divulgarse junto con el resto de las instrucciones criptográficas. Cuando un usuario genera un mensaje con la clave pública, obtiene un texto extraordinariamente difícil de descifrar para quien solo disponga de dicha clave, pero muy sencillo de reconstruir para quien tenga, además, la clave privada.

Una analogía usual para ilustrar el funcionamiento de la criptografía de clave pública es la siguiente. Usted y yo nos

proponemos intercambiar un mensaje en secreto. Yo le envío un candado abierto (la «clave pública»), pero conservo la llave (la «clave privada»). Usted escribe el mensaje, lo introduce en una caja fuerte, asegura la caja con el candado y me la envía por correo. Si alguien intercepta la caja fuerte por el trayecto, le resultará muy difícil abrirla. Sin embargo, yo no tendré problemas para hacerlo, ya que la llave obra en mi poder.

Por desgracia, los métodos criptográficos de clave pública no son invulnerables desde un punto de vista informático. Suelen basarse en funciones asimétricas; es decir, operaciones matemáticas que pueden ejecutarse con relativa facilidad, pero cuya operación inversa requiere largos tiempos de cómputo. La multiplicación de números primos nos proporciona un buen ejemplo: dado un conjunto de números primos, su producto puede calcularse con rapidez; sin embargo, hasta ahora nadie ha descubierto un algoritmo eficiente para descomponer un número dado en sus factores primos.

Los métodos criptográficos de clave pública dependen de funciones asimétricas. Están diseñados de manera que quien solo posea la clave pública se vea obligado a calcular la función asimétrica en el sentido «difícil». Y confiamos en que dicho cálculo resulte tan costoso que, en la práctica, ni siquiera un ordenador muy potente pueda llevarlo a término.

Sin embargo, esa manera de proceder no está exenta de riesgos. Parte del problema se debe a que, aunque no conozcamos algoritmos eficientes para calcular tales funciones inversas, nadie ha conseguido demostrar que dichos algoritmos no existan. Por ejemplo, hoy por hoy carecemos de una prueba de la inexistencia de algoritmos eficientes para descomponer un número en sus factores primos. La mayoría de los matemáticos juzga muy improbable que existan; pero, si no fuese así y alguien hallase un día un algoritmo rápido para factorizar números, podría desbaratar muchos de los métodos criptográficos de clave pública usados en la actualidad.

Las vulnerabilidades van más allá. Cuando hablamos de la inexistencia de algoritmos eficientes para descomponer un número en factores primos, nos estamos refiriendo a cálculos que pueden implementarse en un ordenador tradicional. Sin embargo, la situación cambia al considerar ordenadores cuánticos. En 1994, el matemático Peter Shor descubrió un algoritmo que, en un ordenador cuántico, permitiría factorizar números enteros con gran rapidez.

Hoy por hoy, los ordenadores cuánticos que pueden construirse son tan rudimentarios que, en ellos, resulta imposible implementar un algoritmo de Shor capaz de factorizar números grandes. Pero se trata de una limitación técnica que, en principio, podría sortear un adversario muy poderoso; por ejemplo, un país enemigo.

Ignoro qué métodos criptográficos utilizan nuestros Gobiernos para cifrar sus mensajes más secretos. Pero, si tuviera que apostar, diría que se basan en métodos seguros del estilo de los que hemos descrito aquí. Mientras no haya necesidad de usar claves públicas, no existe ninguna razón para introducir vulnerabilidades en un método criptográfico.

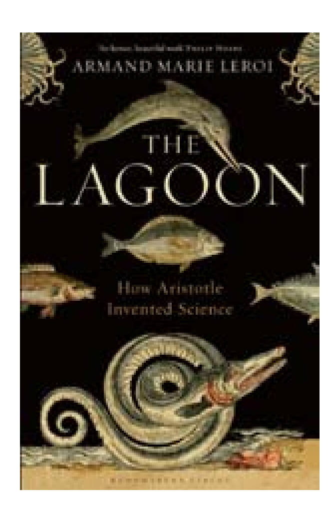
PARA SABER MÁS

Scott Aaronson ofrece una magnífica discusión de estas cuestiones en su libro **Quantum computing since Democritus** (Cambridge University Press, 2013).

EN NUESTRO ARCHIVO

Comunicaciones secretas. Martin Gardner en *IyC*, octubre de 1977 y en «El universo matemágico de Martin Gardner», colección *Temas de IyC* n.º 77, 2014.

Computación cuántica. Agustín Rayo en *IyC*, junio de 2010.



THE LAGOON. HOW ARISTOTLE INVENTED SCIENCE.

Por Armand Marie Leroi. Bloomsbury Circus, Londres, 2014.

Aristóteles

Primera aproximación sistemática al estudio de la naturaleza viva

A lo largo del siglo xx, toda una generación sobresaliente de eximios profesionales de los estudios clásicos (David Balme, Allan Gotthelf, Wolfgang Kullmann, James Lennox, Geoffrey Lloyd y Pierre Pellegrin) abordaron los tratados biológicos de Aristóteles como si fueran tratados de filosofía natural, con particular énfasis en la filología. En un giro copernicano, Armand Marie Leroi coloca ahora el foco sobre un Aristóteles poco conocido, el pionero del método científico llevado a la práctica.

Hijo del médico de la corte de Macedonia, Aristóteles (384-322 a.C.) aportó las bases de una ciencia que perduró 18 siglos. Quedó huérfano muy niño y se trasladó a Atenas, donde se hizo discípulo de Platón. En el año 342 a.C. volvió a Macedonia, como tutor y consejero de Alejandro Magno, hijo de Felipe II. Más tarde fundó en Atenas su propia escuela, en el jardín de su propiedad (Liceo). En la Academia platónica, aprendió la búsqueda de la verdad en el reino intangible de las ideas, pero no tardó en decantarse por el mundo de la realidad tangible.

Exploró los misterios del mundo natural y puso las bases de una ciencia que perduró 18 siglos. Enseñó sobre todo el conocimiento científico y filosófico de su tiempo. No fue, sin embargo, matemático. Sus opiniones en física y cosmología, a menudo erradas, no dejaban de tener su coherencia. Algunos errores tardaron tiempo en desecharse, como el de que los cuerpos supralunares eran perfectos e inmutables. Pero su imponente talla filosófica nunca se puso en cuestión. Poseemos muchas de sus lecciones en forma de libros: *Categorías, Sobre la interpretación, Analíticos anteriores, Analíticos posteriores, Tópicos, Refutaciones sofistas, Metafísica, Ética a Nicómaco, Poética, Política.*

Durante los años 345-342 se dedicó a la investigación de la fauna marina en el golfo de Kallonis, en Lesbos. Los escritos de biología y zoología representan algo más de una quinta parte de su obra conservada. Presta atención a la vida en sus múltiples formas, reflejada en sus minuciosos datos y cuidados análisis. De los varios tratados que nos han llegado en el *Corpus Aristotelicum*, la *Investigación sobre los animales* (*Historia animalium*) es el más extenso. Junto a la *Investigación* (con sus diez libros, según la edición de Andrónico de Rodas, que añadió dos o tres libros al conjunto auténtico), hay que considerar *Sobre las partes de los animales, Sobre la marcha de los animales, Sobre el movimiento de los animales* y *Sobre la generación de los animales*. Este tipo de escritos enlaza con temas estudiados en los *Pequeños tratados de historia natural* y *Sobre el alma.*

En el Liceo impartió un gran curso de ciencia natural. Aconsejaba empezar por una descripción abstracta de la naturaleza, luego había que abordar el movimiento de las estrellas, para seguir con la química, meteorología y geología en riguroso orden, para acometer el grueso del estudio, a saber, la exposición sobre los seres vivos, del más humilde a nosotros. En el dominio de la zoología atiende a la morfología comparada, la anatomía funcional, el movimiento, la respiración, la muerte y lo que hace que los animales perduren. También, de la reproducción y del curso del desarrollo embrionario. Las cuestiones sobre las plantas se han perdido. Debió de ser un maestro exigente: «Las raíces de la educación son amargas» escribió, «pero sus frutos son dulces». «El hombre cultivado es superior al que carece de formación, igual que el ser vivo es superior al muerto.»

El término *naturaleza* (*physis* en griego) aparece ya en Homero. Aristóteles introdujo la expresión *ciencia natural* (*physike episteme*) y su complementaria, *filosofía natural*. Con el estagirita, se consolida la idea de un cosmos singular y geocéntrico, un universo cuya unicidad y eternidad, inmutables a lo largo del tiempo, no estaban aseguradas con Platón.

Para Aristóteles, la naturaleza, principio de actividad y movimiento, no hace nada en vano («*tèn physin methèn máten poiei*»), sino que procede siempre según un orden, dirigida a un *télos*. El Bien y la Belleza constituyen el objetivo final de toda esa atractiva pluralidad de seres y formas, organizados en la escala de perfección natural que va de las plantas y los organismos inferiores hasta el hombre, animal superior, lógico y político. La visión aristotélica del universo biológico está guiada por su teleología. Hay en toda la Naturaleza una teleología implícita e inmanente. Las funciones que cumplen diferentes órganos y organismos nos revelan las causas finales, que explican su existencia y propiedades. La teleología aristotélica no depende de un demiurgo, de una realidad externa, sino de su propia naturaleza.

Por sus obras desfila más de medio millar de especies. De ellas hay 75 mamíferos, 204 aves, 30 peces, 22 anfibios y reptiles, 7 cefalópodos, 18 crustáceos, 83 insectos y 39 ostracodermos y zoófitos. Sus observaciones sobre el mundo de los insectos marcan un progreso como fundación real de la ciencia entomológica. Realizó sus propias disecciones y así descubrió la «linterna de Aristóteles» del erizo de mar o la placenta de la musola dentuda (*Mustelus asterias*). Otras veces realizó experimentos sistemáticos, como las disecciones seriales de huevos fecundados e incubados para describir el patrón de desarrollo del embrión. El desarrollo del embrión de pollo es un capítulo obligado en todas las historias de la experimentación científica.

Se trataba de determinar los rasgos que definían a cada especie para derivar de ellos su función. Había que identificar los rasgos muy generales para ir descendiendo y acotando los distintivos de grupos diferentes. En la Academia platónica había sido testigo de la reiterada discusión sobre la clasificación de seres y objetos, según el procedimiento de la dicotomía progresiva. Pero no le interesa una división o clasificación apriorística, sino la que esté fundada sobre la observación real. Trabaja con las

nociones de *genos* y *eidos*, género y especie, nociones, por otro lado, con un valor no muy exacto ni muy preciso siempre. La ordenación por dicotomía se acompaña de una anatomía comparada y de una concepción funcionalista de los animales y sus partes, analizadas por analogía y en mutuo contraste.

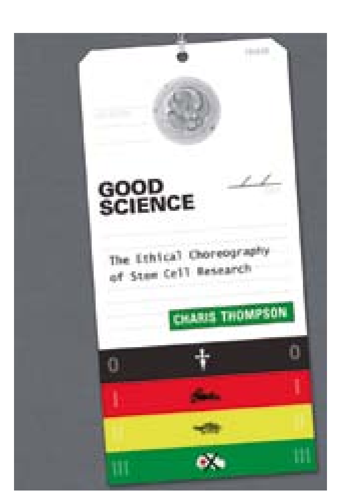
Aristóteles reconoce grupos mayores que nosotros agrupamos ahora en géneros, familias, órdenes, clases y phyla. Los llama *megista gene* («grupos grandes»). Algunos tenían nombres comunes: *ornis* («ave») o *ikthys* («pez»), pero otros eran tecnicismos: *malakostraka* («de concha blanda», como la mayoría de los crustáceos), *ostrakoderma* («de concha dura», la mayoría de los equinodermos, gasterópodos, bivalvos, percebes), *entoma* («divisibles», los insectos, miriápodos, quelíceros), etcétera. La gran partición se ejemplifica entre *anhaima* («animales sin sangre», invertebrados) y *enhaima* («animales con sangre», vertebrados). Los que portan sangre se subdividen a su vez en vivíparos (hombre, cetáceos, rumiantes) y ovíparos (aves, anfibios, reptiles, serpientes y peces). Los privados de sangre se subdividen entre los que producen huevos perfectos (cefalópodos, crustáceos), huevos peculiares (insectos), mucílago o yema (moluscos, equinodermos) y los nacidos por generación espontánea (esponjas, celentéreos).

Los tipos animales forman un *continuum* jerárquico. Crean una escala, que va de la materia inerte al primer motor, ascendiendo desde las plantas, los zoofitos (animales-planta, como las esponjas), los insectos, los cuadrúpedos ovíparos, los vivíparos y el hombre. La necesidad de trabajar con orden y parsimonia lleva a distinguir grupos en este continuo. El criterio fundamental es la vitalidad manifestada por el calor animal, que se refleja en el modo de reproducción, ya que los dotados de mayor calor interno engendran hijos vivos, seguidos por los que ponen huevos más o menos perfectos, hasta los que se generan espontáneamente de materiales inorgánicos u orgánicos en descomposición.

Reconoce que las características de los animales varían con la escala de la jerarquía de la naturaleza. Las diferencia entre grupos (pensemos en la diferencia entre un gorrión y un gavilán, dentro de un grupo mayor son relativamente sutiles). Comparten una misma estructura corporal y solo divergen en tamaño y forma, en «lo más y lo menos». Buena parte de sus descripciones biológicas se refieren a las diferencias en razón de picos, sistema excretor y cerebro. En cambio, las diferencias entre grandes grupos, entre peces y aves, es mucho más radical. Corresponden a la anatomía y disposiciones de los órganos, a la arquitectura global. Y a su geometría: el animal tiene tres ejes con seis polos: superior e inferior; anterior y posterior; izquierdo y derecho. El polo superior es la zona de la nutrición; el inferior, la de excreción. El polo anterior concentra los órganos de los sentidos y la dirección en que se mueve; el opuesto es el posterior. Derecho e izquierdo tienen su significado común.

No se limita a recopilar datos y observaciones. Se plantea y responde a numerosas cuestiones: ¿por qué los peces tienen agallas y no pulmones? ¿Por qué tienen aletas y no patas? ¿Por qué las aves tienen buche y los elefantes trompa? ¿Por qué las águilas ponen pocos huevos y muchos los peces? ¿Por qué solo los humanos andan erguidos? ¿Qué pasa con los camellos? ¿Cómo vemos, olemos, oímos y sentimos el tacto? ¿Hasta dónde llega la influencia del medio sobre el desarrollo? ¿Por qué los hijos se parecen unas veces a los padres y otras no? ¿Qué función cumplen los fluidos vaginales, la menstruación, los testículos y el orgasmo? ¿Cuál es la causa de los nacimientos monstruosos? ¿Cómo consiguen mantenerse vivos los organismos? ¿Por qué se reproducen? ¿Por qué mueren? Con particular detalle se detiene en la anatomía del erizo de mar, ascidias y gasterópodos. Describe pico y patas de aves costeras. De los delfines le fascinan su respiración aérea y su amamantamiento de las crías, pese a su aspecto de pez. Su amplio análisis de peces ilustra su morfología, régimen alimentario, procreación, sonidos que emiten y pautas empleadas en sus migraciones. Su animal favorito fue la sepia (*Sepia officinalis*).

—*Luis Alonso*



GOOD SCIENCE. THE ETHICAL CHOREOGRAPHY OF STEM CELL RESEARCH.

Por Charis Thompson. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2013.

Células madre

Nulla scientia sine ethica

Los avances en ciencias biomédicas tienen, por lo común, implicaciones sociales. También éticas. Para recordárnoslo están los códigos deontológicos y los comités de bioética, disciplina esta que se inicia tras la Segunda Guerra Mundial, cuando se hace obligatorio el empleo de modelos animales en ensayos, en sustitución de las pruebas sobre humanos. Pero antes de cualquier intervención desde fuera, importa tanto conocer el modo de proceder de la naturaleza.

Luego de fusionarse las membranas del espermatozoide con la del óvulo, comienza una serie de fenómenos biológicos que desencadenan el desarrollo embrionario. Se inicia una serie de interacciones entre el óvulo y el material del espermatozoide introducido en el citoplasma materno. A las pocas horas de la fecundación empieza la expresión del genoma del embrión. Pronto asistimos a la primera división del cigoto, que genera dos células, o blastómeros, cada una con 46 cromosomas. Cada blastómero tiene potencialidad para originar un ser humano completo como lo demuestra el fenómeno de los mellizos monocigóticos (gemelos idénticos). Cada blastómero se va dividiendo sucesivamente por mitosis de dos en dos. Al cabo de tres días, el embrión está lleno de células (blastómeros) y semeja una mora (mórula). Al cuarto día,

el embrión crece y se produce una cavidad: se genera un blastocisto. En el blastocisto aparecen territorios celulares comprometidos con funciones específicas. La masa celular interna del blastocisto posee las células troncales (células madre, o *stem cells*), que son células pluripotenciales con capacidad de producir cada una de las células de los diferentes tejidos propios del embrión humano. Las líneas de células estaminales pluripotentes pueden extraerse de embriones tempranos, antes de su implantación en el útero. Las células se denominan células madre embrionarias.

Las líneas de células madre pluripotentes pueden renovarse continuamente en cultivo y, a partir de esa autorregeneración, formar la mayoría de los tejidos del organismo (por eso son pluripotentes). Tamaña capacidad para desarrollar un amplio espectro de tipos celulares funcionales las convierte en cruciales para el estudio del desarrollo de los tejidos y para el estudio de las enfermedades degenerativas.

Suele fecharse el origen de la bioética moderna con el juicio de Nuremberg a los médicos nazis. La causa, «Estados Unidos de América contra Karl Brandt et alii», tuvo su vista durante 1946 y 1947. A los reos se les acusó de crímenes de guerra y crímenes contra la humanidad, de haber instigado y participado en experimentos médicos sobre prisiones de guerra y civiles de los países ocupados y conciudadanos sin consentimiento de ellos. Se les responsabilizó de asesinato en masa en aplicación del programa eutanásico Aktion T4 y experimentos clínicos que desarrollaron con brutalidad, crueldad y tortura hasta la muerte. En cambio, la investigación sobre células madre es de fecha más reciente. Comenzó con experimentos de biofísica sobre ratones diseñados para comprobar la supervivencia tras una exposición radiactiva. A partir de esos animales se aislaron y caracterizaron también, en 1981, las primeras células embrionarias. Dirigieron los ensayos Martin John Evans y Gail Martín. Los campos biomédicos humanos relacionados con las células madre embrionarias son la genómica, la bioinformática, la medicina regenerativa y personalizada, las técnicas seleccionadoras de reproducción y prenatales, la potenciación humana y la longevidad, las neurociencias y la biología sintética. Todas ellas tienen ética, porque interseccionan con temas controvertidos: eugenesia, privacidad genética, comercialización, regeneración y blindaje de la vida humana.

El año 1998 vio la publicación del ensayo científico que había logrado por vez primera una creación de líneas de células madre embrionarias humanas. James Thomson y sus colegas, del Centro Regional de Wisconsin de Investigación sobre Primates, daban a conocer cómo habían conseguido líneas celulares pluripotentes derivadas de blastocistos. Tras la proliferación indiferenciada in vitro, mantenían capacidad para formar las tres capas germinales embrionarias.

Para crear líneas de células madre, se retiran células de la masa interior y se cultivan, lo que impide que el embrión se implante en el útero. En el año 2006 Robert Lanza y su equipo idearon un nuevo método: retirar una célula del estadio de ocho células de desarrollo (antes de la formación del blastocisto). Esa célula de blastómero, examinada por si portaba defectos genéticos, le sirvió al grupo de Lanza para producir líneas de células madre embrionarias, sin comprometer el embrión del que se obtenía un blastómero. Ese blastómero se cultivaba con líneas celulares de células madre embrionarias ya establecidas, y luego se separaba de ellas para formar líneas de células madre embrionarias enteramente competentes.

«Lo que hemos conseguido por vez primera es crear células madre embrionarias humanas sin tener que destruir el embrión», declaraba el 23 de agosto de 2006. El artículo, publicado en línea, despertó un enorme interés. Pero no se decía toda la verdad. No tardó en descubrirse que se habían sacrificado los 16 embriones utilizados. Muchos científicos cuestionaron incluso que fuera real parte de lo expuesto por los autores. Llovía sobre mojado tras el escándalo provocado, tiempo atrás, por el investigador surcoreano Woo Suk Hwang, quien mintió cuando declaró que había creado líneas de células madre embrionarias a partir de embriones humanos clonados. Woo Suk Hwang publicó dos artículos famosos en *Science* en 2004 y en 2005, donde sostenía que había conseguido producir líneas de células madre a partir de embriones obtenidos por transferencia nuclear y, luego, haber creado líneas de células madre con ADN propio de los pacientes. No tardó en quedar descubierta la falsedad de lo publicado por Hwang y su equipo sobre los óvulos empleados; ni había tales líneas celulares. Fueron obligados a retractarse.

Desde que se obtuvieron hace más de 30 años, las células madre embrionarias se han propuesto como fuente de sustitución de células en medicina regenerativa, pero su plasticidad y capacidad ilimitada de autorregeneración ponían en cuestión su seguridad, al sugerirse la posibilidad de formación de tumores, rechazo del sistema inmunitario y peligro de diferenciación en tipos celulares no deseados.

En razón de su natura privilegiada en lo que se refiere al sistema de rechazo inmunitario (capacidad para tolerar antígenos extraños o células no histocompatibles sin desencadenar una respuesta inmunitaria), las enfermedades que afectan a los ojos sí constituyen una aplicación atractiva para empezar a emplear esa técnica. La degeneración del epitelio del pigmento retiniano conduce a la pérdida de fotorreceptores en enfermedades que amenazan la visión. Encierra, pues, un evidente atractivo para una regeneración potencial. En la degeneración macular relacionada con la edad, los fenómenos genéticos y ambientales predisponen a los pacientes a unas tensiones que terminan por comprometer el epitelio pigmentario retiniano. En la distrofia macular de Stargardt, la degeneración del epitelio pigmentario retiniano viene inducida por segmentos de fotorreceptores genéticamente alterados. Esas dos degeneraciones maculares constituyen, respectivamente, dos causas principales de ceguera adulta y juvenil en los países desarrollados.

En fecha reciente, a mediados del último mes de octubre, los periódicos y medios de comunicación del mundo occidental resaltaban una noticia científica: en el laboratorio de Robert Lanza, de Advanced Cell Technology, se había logrado desarrollar epitelio pigmentario retiniano derivado de células madre embrionarias humanas en pacientes con degeneración macular asociada a la edad y distrofia macular de Stargardt.

Los autores de ese trabajo muestran la seguridad a medio y largo plazo de células derivadas de células madre embrionarias humanas que se han trasplantado en pacientes. Se trataba, en efecto, de discernir la seguridad y tolerancia del trasplante subretiniano de epitelio pigmentario retiniano derivado de células madre embrionarias humanas. De los voluntarios del ensayo, nueve eran mayores de 18 años y otros nueve mayores de 55 años. Los primeros sufrían distrofia macular de Stargardt; los segundos, degeneración macular atrófica asociada a la edad. Para cada trastorno ocular se trataron tres cohortes de dosis (50.000, 100.000 y 150.000 células). El seguimiento de los pacientes se prolongó a lo largo de 22 meses con series de pruebas sistémicas, oftálmicas y de imagen. No se advirtieron indicios de proliferación adversa o recha-

zo, ni problemas sistémicos de seguridad relacionados con el tejido trasplantado. Se logró una óptima agudeza visual en diez ojos, mejor o igual en siete y disminuyó en uno.

De ello se desprende que se ha conseguido la primera demostración de la seguridad, entre medio y largo plazo, la supervivencia del injerto y la actividad biológica de la progenie de células madre pluripotentes en cualquier paciente. El ensayo ha puesto de relieve la capacidad de las células madre embrionarias humanas para reparar o sustituir tejidos enfermos y sin fármacos adecuados.

Llevada al terreno de la legislación, la investigación sobre células madre pluripotentes, las normas sugeridas, aprobadas o rechazadas de acuerdo con el juego democrático de la alternancia en el poder, dependen del enfoque que se posea sobre la dignidad de la persona y el respeto a la vida en sus diferentes fases. La controversia se hace especialmente intensa cuando se trata de la derivación de nuevas líneas celulares a partir de embriones sobrantes en los procesos de fecundación in vitro. El criterio ético del que nadie, públicamente al menos, quiere mostrarse alejado es que el fin no justifica los medios. Unos lo esgrimen para mostrar su oposición al sacrificio de embriones. Otros creen ver una compatibilidad entre los fines de la ciencia (medicina regenerativa) y los fines de la ética. A la postura de los segundos se le conoce por ética consecuencialista o utilitarista. Para los primeros, la labor de la ciencia, como la de cualquier actividad humana, debe estar sujeta a un código de valores o ético; para los segundos, la opinión de la mayoría resulta determinante. La ética se ocupa del bien y del deber de realizarlo. Cuenta el hombre para ello con el conocimiento de la naturaleza, que le permite tomar decisiones morales mejores o, al menos, mejor informadas. Ahora bien, un conocimiento particular de la naturaleza no dicta una misma moral. Existe una relación compleja entre naturaleza y acción moral.

—Luis Alonso



WORLDS WITHOUT END. THE MANY LIVES OF THE MULTIVERSE.

Por Mary-Jane Rubinstein. Columbia University Press, Nueva York, 2014.

Multiverso

Entre el rigor de la matemática y la fantasía científica

La difusión de la idea de multiverso y de los conceptos asociados de inflación y teoría de cuerdas debe mucho a *Scientific American* (*Investigación y Ciencia* en el mundo de expresión española). De hecho, son tres los foros principales donde ha venido madurando la cuestión: las revistas de física subatómica, las de cosmología y la nuestra. Así lo reconocen quienes trabajan en el campo o relatan su historia. Como la autora de este libro.

La palabra griega *kosmos* la encontramos ya en la *Ilíada* de Homero, para designar el orden de los soldados en el campo de batalla o el de los remeros en la nave. Con ese término indicaba Herodoto el alto grado de organización del estado de Esparta; también, el orden en general. De ahí pasó a denominar al mundo en su globalidad, con Pitágoras, en el siglo VI a.C., y en Protágoras, un siglo después. Ese significado quedó plenamente asentado en el tiempo de Platón (429-347 a.C.). Otros términos empleados por este para referirse al universo fueron *pan* («todo»), *onta* («todas las cosas»), *ouranos* («el firmamento») y *to olon* («el todo»). En el *Timeo*, Platón insiste en que el mundo debe ser singular y perdurable. Pero su mundo está sembrado de diferencias, de mezcla y pluralidad; es un universo de interrelación entre orden y desorden, entre lo singular y lo plural, entre la unidad y la diferencia.

Con Aristóteles se consolida la idea de un cosmos singular y geocéntrico, un universo cuya unicidad y eternidad no estaban aseguradas con Platón. Como el estagirita explica en *De caelo*, el mundo puede ser generado y corruptible o increado e incorruptible. Pero no al mismo tiempo generado e incorruptible. Un universo con un principio no puede ser un universo sin un final. De las dos opciones que plantea (generado y corruptible, o increado e incorruptible), Aristóteles optará por la segunda, para subrayar que un mundo que exista eternamente ha de ser único.

La teoría de una posible multiplicidad de mundos se remonta a los filósofos atomistas del siglo V a.C. Frente a los principios de la materia constituidos por un solo elemento (agua, aire, fuego, lo indefinido) de los filósofos jónicos, Leucipo y su discípulo Demócrito sostenían que el mundo estaba compuesto no de un elemento básico, sino de piezas microscópicas e indivisibles de materia denominadas átomos. Esos átomos se mueven eternamente en un vacío (*kenon*). En un tiempo y lugar indeterminados colisionan al azar y forman un vórtice, en el que los átomos quedan mutuamente entrelazados, entrelazamientos que terminarán por dar lugar a un universo. Lo mismo acontecerá con otros vórtices. Pero ni la multiplicidad espacial de los atomistas ni la posterior multiplicidad temporal de los estoicos triunfaron.

De Aristóteles hasta Einstein, la tradición filosófica y científica sostuvo que el universo era uno e inmutable. En la Edad Media, santo Tomás de Aquino defendió la singularidad cósmica en la línea de Aristóteles, una postura que años más tarde condenaría el obispo Etienne Tempier de París cuando declaró que la tesis de que Dios no podía crear más de un mundo era anatema. Los decenios y siglos que siguieron fueron testigos de un torrente de tratados sobre la posibilidad de mundos múltiples; citemos, por mor de ejemplo, el multiverso sin centro de Nicolás de Cusa en el siglo XV y los mundos infinitos de Giordano Bruno.

Una característica notable de nuestro universo reside en que las constantes físicas poseen los valores que se necesitan para permitir la formación de estructuras complejas, entre ellas, los seres vivos.

A eso se le llama ajuste fino. Steven Weinberg, Martin Rees, Leonard Susskind y otros sostienen que la hipótesis de un multiverso proporciona una explicación elegante para esta llamativa coincidencia: si las constantes de la naturaleza adoptan todos los valores posibles en un conjunto lo bastante grande de universos, aquellos que hacen posible la vida deberán darse en algún lugar. De ese modo se introdujo la «solución multiverso» que resolvía el problema del ajuste fino sin necesidad de apelar a una mente extramundana. Hay más de un multiverso, más de un conjunto hipotético de universos. Algunos de esos conjuntos son incompatibles entre sí. De otros se dice que se encuentran encajados a la manera de muñecas rusas, en una jerarquía cósmica de infinitos dentro de infinitos. Otros modelos podrían ser maneras diferentes de expresar el mismo conjunto. Tal es lo que acontece cuando hablamos del «paisaje» de la teoría de cuerdas [*véase* «El paisaje de la teoría de cuerdas», por Raphael Bousso y Joseph Polchinski; Investigación y Ciencia, noviembre de 2004].

La primera hipótesis de fuste científico sobre el multiverso emergió a finales de los años cincuenta, cuando Hugh Everett convirtió la interpretación de los muchos mundos en explicación alternativa a la interpretación de Copenhague, entonces estándar, de la mecánica cuántica, avanzada por Niels Bohr y Werner Heisenberg [*véase* «Los muchos mundos de Hugh Everett», por Peter Byrne; Investigación y Ciencia, febrero de 2008]. Otra hipótesis temprana sobre el multiverso entró en escena a mediados de los ochenta, cuando Alexander Vilenkin, André Linde, Alan Guth, Andreas Albrecht y Paul Steinhardt propusieron que el proceso inflacionario que generó nuestro universo podía ir eternamente engendrando nuevos universos [*véase* «El universo inflacionario», por Alan H. Guth y Paul J. Steinhardt; Investigación y Ciencia, julio de 1984 *y* «El universo inflacionario autorregenerante», por Andréi Linde; Investigación y Ciencia, enero de 1995].

El universo observable se extiende hasta una distancia de unos 42.000 millones de años luz, nuestro horizonte visual cósmico. Pero no existe ninguna razón para suponer que todo termina ahí. Más allá podría haber muchos —tal vez infinitos— dominios similares al nuestro. Cada uno habría comenzado con una distribución diferente de materia, pero todos se regirían por las mismas leyes de la física. La mayoría de los cosmólogos aceptan ese tipo de multiverso, que Max Tegmark tipifica como de «nivel 1» [*véase* «Universos paralelos», por Max Tegmark; Investigación y Ciencia, julio de 2003]. Se supone que nuestro volumen constituye una muestra representante del total. Otros seres en lugares lejanos verían regiones diferentes. El conjunto de todas esas regiones, visibles o no por nosotros, conformaría la versión más sencilla de multiverso.

En el segundo nivel de Tegmark, las leyes físicas varían dentro del multiverso, de suerte que las regiones remotas pueden considerarse universos distintos. Esta versión es necesaria para explicar, por ejemplo, la constante cosmológica. La mayoría de esos universos serían estériles, pero algunos hervirían de vida. Defensor de este multiverso de «nivel 2» es Vilenkin, quien defiende un conjunto infinito de universos, con un número infinito de galaxias y planetas. Por su propia naturaleza, la idea de multiverso de nivel 2 trasciende toda verificación empírica. Quienes se adhieren a ese modelo han elaborado mecanismos diversos para explicar cómo habrían surgido esos mundos y dónde podrían encontrarse. De entre todas las opciones, la que goza de mayor aceptación es el modelo de inflación caótica. Sostiene este que, a gran escala, el espacio es un vacío en eterna expansión. En el tercer nivel de Tegmark, habría universos paralelos solo como estados cuánticos. El multiverso de nivel cuarto proclama que el multiverso no solo está bien descrito por la matemática, sino que es matemática. Todas las estructuras matemáticas posibles presentarían existencia física y, colectivamente, ofrecerían un multiverso que subsumiría todos los demás.

Gozó de especial predicamento el avanzado en 1977 por John Archibald Wheeler: un universo cíclico. Una secuencia infinita de universos que van alternando su colapso y su expansión, que perdura siempre. Cada gran implosión rebota en una nueva singularidad inicial (*big bang*). Los universos se van sucediendo bajo condiciones iniciales enteramente inéditas.

Lo mismo el multiverso de Vilenkin que el de Linde se basan en la cosmología cuántica (una derivación especulativa de la mecánica cuántica) y en el universo inflacionario. Para ellos, las fluctuaciones cuánticas en la nada (donde «nada» significa no solo ausencia de materia, sino también de espacio y tiempo) producen una multiplicidad (infinitud) de nucleaciones, cada una de las cuales conduce a un superuniverso diferente y eternamente inflacionario. En 1987 Steven Weinberg partió de la hipótesis de multiverso para predecir que nuestro universo observable debía tener una constante cosmológica de valor no cero, de una cuantía suficiente para acomodar una aceleración en la expansión del universo. La predicción se confirmó diez años más tarde a través de las observaciones de supernovas lejanas por dos equipos de astrónomos, liderados por Saul Perlmutter, Adam Riess y Brian Schmidt [*véase* «Cuando la aceleración cambió de signo», por Adam G. Riess y Michael S. Turner; Investigación y Ciencia, abril de 2004]. Posteriormente, la teoría de cuerdas y la cosmología inflacionaria apuntalarían la hipótesis de la existencia de un multiverso, un conjunto enorme de 10^{500} universos. La inflación eterna, teoría dominante sobre la evolución temprana del universo, se halla estrechamente unida a la teoría de cuerdas.

Lee Smolin propuso un modelo cosmológico evolutivo en cuyo marco, siempre que se forma un agujero negro, los procesos que se desarrollan en su interior podrían desencadenar la creación de otro universo en un espacio disjunto del suyo propio. El así llamado universo-bebé hereda algunas de las propiedades de su universo progenitor, incluida la capacidad de producir nuevos agujeros negros y engendrar nuevas generaciones de universos sin final. Lisa Randall y Raman Sundrum consideran los multiversos brana, subespacios tetradimensionales de un supuesto espaciotiempo pentadimensional. Las branas se hallaban separadas en dimensiones espaciales extra, sin contacto entre sí [*véase* «Salir de la oscuridad», por Giorgi Dvali; Investigación y Ciencia, abril de 2004].

Muy pocos discuten que con el multiverso nos hallamos ante un nuevo paradigma cosmológico. Sin embargo, su punto de apoyo, la inflación, tendrá que esperar. En marzo de 2014 los científicos que trabajaban en el experimento BICEP2, del Polo Sur, declararon que, a través del estudio del resplandor de la gran explosión inicial, habían obtenido una prueba directa de que el cosmos recién nacido había acometido un brote singular de desarrollo exponencial, una inflación cósmica. Pero, pasados unos meses, los investigadores del observatorio espacial Planck de la ESA, demostraron que la radiación procedente del polvo de nuestra galaxia explica parte y, posiblemente toda, la señal de BICEP2 [*véase* «¿Inflación o polvo?», por Licia Verde; Investigación y Ciencia, julio de 2014].

—Luis Alonso

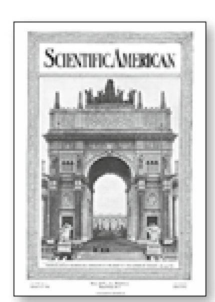
Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Febrero 1965

Experimentos a escala planetaria

«El informe sobre la Ciencia en el Fomento del Bienestar Humano, del Comité de la Asociación Americana para el Progreso de la Ciencia, titulado *La integridad de la ciencia*, se mostró especialmente crítico con respecto a la incapacidad de evaluar antes de tiempo los efectos generales de los experimentos científicos y las innovaciones tecnológicas. En ese terreno, citó el uso extendido de pesticidas y detergentes sin comprobaciones preliminares sobre sus consecuencias en la contaminación ambiental. De similares críticas fueron objeto dos importantes proyectos militares americanos: el Proyecto Starfish, una explosión nuclear a gran altura sobre el océano Pacífico, y el Proyecto West Ford, que trata de poner en órbita millones de minúsculas agujas de cobre que harían de reflector para las comunicaciones militares. En palabras del comité, "la ciencia ha desarrollado unos poderes de una intensidad y a una escala mundial sin precedentes. El planeta en su totalidad puede servir hoy de laboratorio".»



Febrero 1915

Teléfono de costa a costa

«Hace treinta y nueve años, en su dormitorio de una pensión de Boston, Alexander Graham Bell asía un tosco transmisor telefónico y exclamaba: "Señor Watson, venga aquí; le necesito"; Thomas A. Watson, al otro extremo del cable en la habitación contigua, oía la primera frase jamás transmitida por teléfono y, rebosante de emoción, irrumpía en el dormitorio para felicitar a su socio. La semana pasada, el doctor Bell, a través del mismo cable, y con una réplica del viejo aparato, volvía a llamar al señor Watson. Pero esta vez Bell estaba en Nueva York, en el despacho del presidente de la Compañía Estadounidense de Teléfono y Telégrafo, y todo un continente lo separaba de su antiguo socio, en San Francisco.»

Sol desconcertante

«Se han presentado tres hipótesis diferentes para explicar cómo el Sol ha estado durante siglos emitiendo sustancialmente la misma cantidad de calor; a saber, por reacción química, por energía intraatómica (como la que exhibe el radio) y por atracción gravitatoria. Unos cálculos precisos basados en datos recientes parecen señalar que la última teoría, propuesta por Helmholtz, es la más defendible. Puede calcularse que la energía producida por cuerpos que caen en la superficie del Sol es cuatrocientas veces inferior a la necesaria para mantener el calor solar. Por tanto, solo queda una hipótesis: que el calor se genera por la contracción del propio astro; y solo eso puede y debe responder por todo el calor que irradia.»

Los rayos X en campaña

«Aunque el trabajo con rayos X se haya convertido, incluso en épocas normales, en una ayuda tan valiosa para los profesionales de la medicina que ningún hospital moderno pueda pasar sin ella, en la guerra resulta aún más útil y necesaria. De este modo, siempre que haya que averiguar la forma y la posición de un proyectil en el cuerpo de un paciente, la fotografía de Röntgen proporcionará en poco tiempo toda la información deseada. Se han perfeccionado equipos móviles de radiografiado (*véase la ilustración*) para hospitales del ejército instalados en lugares de acampada, que generalmente permanecen estacionados durante algún tiempo. Además del generador de rayos X, esos equipos incluyen un generador de corriente, casi siempre una dinamo de gasolina, al objeto de independizarlos de otras fuentes de electricidad. —Del corresponsal en Berlín de *Scientific American*.»



UNIDAD MÓVIL DE RAYOS X alemana de uso militar en la Gran Guerra, 1915.

SCIENTIFIC AMERICAN SUPPLEMENT, VOL. LXXIX, N.º 2042, 20 DE FEBRERO DE 1915



Febrero 1865

Vacas contra la viruela

«En Nápoles obtienen la vacuna directamente de la vaca. El asunto ha sido tomado en serio en París y se estima que puede dar lugar a un buen negocio. Cada vaca, se dice, produce 100 pústulas; a 5 francos la unidad, ello rinde 500 francos, sin que el animal se devalúe en absoluto. Esta práctica se recomienda encarecidamente porque garantiza la seguridad de que no se transmite otra enfermedad junto con la vacuna. La viruela está muy extendida en París y sus alrededores, por lo que la ciudadanía es presa de un gran desasosiego.»

ASTRONOMÍA

Más habitables que la Tierra

René Heller

Planetas bastante diferentes al nuestro podrían ser los mejores lugares para albergar vida en el universo.







MEDICINA

Un punto débil del bastión bacteriano

Carl Zimmer

Los biólogos evolutivos intentan atacar a las bacterias mediante una nueva estratagema basada en arruinarles su vida social.

TECNOLOGÍA

Un microscopio para el movimiento

Frédo Durand, William T. Freeman y Michael Rubinstein

Una nueva técnica revela cambios minúsculos en objetos y personas que parecen estar totalmente inmóviles.

MATEMÁTICAS

Las intrigantes matemáticas de Candy Crush

Toby Walsh

En el seno de este sencillo juego se ocultan problemas computacionales complejos. Quizá por ello resulta tan adictivo.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Seth Fletcher, Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT Michael Voss

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Apuntes* y *La era de la hidrodiplomacia*; Andrés Martínez: *Apuntes, La farsa de la araña* y *La ilusión de la inmunidad*; Xavier Giménez: *Apuntes*; José Óscar Hernández Sendín: *Lego a escala atómica* y *Otras nueve grandes ideas*; Guzmán Sánchez: *La edición genética, más precisa*; Javier Grande: *Los fósiles de la Vía Láctea*; Xavier Roqué: *La verdadera historia del led*; Fabio Teixidó: *El comportamiento anómalo de la corriente en chorro* y *Un rompecabezas global*; Alberto Ramos: *Leyes universales*; Pere Molera: *Microsiderurgia*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España